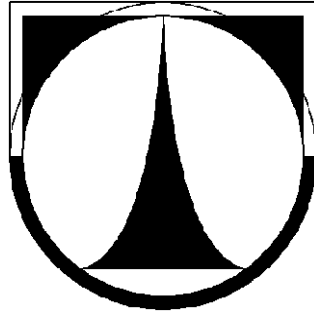


Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní



Jakub Mrázek

**Měření přesnosti polohování a kompenzace polohových chyb**

Diplomová práce

2011

Fakulta strojní

Katedra výrobních systémů

Obor: 2302T010 - Konstrukce strojů a zařízení

Zaměření: Obráběcí a montážní stroje

## **Měření přesnosti polohování a kompenzace polohových chyb**

## **Measuring of adjusting accuracy and positional errors compensation**

KVS - OS - 326

Jakub Mrázek

Vedoucí práce: Ing. Petr Zelený, Ph.D.

Počet stran: 68

Počet příloh: 2

Počet obrázků: 30

Počet tabulek: 5

Počet modelů

nebo jiných příloh: 0

V Liberci 27.5.2011

**TÉMA: Měření přesnosti polohování a kompenzace polohových chyb**

**ANOTACE:** Diplomová práce se zabývá problematikou polohování na prototypu obráběcího CNC stroje. Také se zabývá možnostmi kompenzace polohových chyb pomocí řídicího softwaru, popřípadě pomocí změn v samotné konstrukci stroje. Po naměření a vyhodnocení výsledků byl zpracován kompenzační soubor a po zadání kompenzačních dat do řídicího softwaru byla měření opakována. Jednotlivé součtové chyby se díky kompenzaci pohybují v rozmezí  $\pm 40\mu\text{m}$  a celková přesnost polohování pro osu X je 42 až  $-73\mu\text{m}$ .

**THEME : Measuring of adjusting accuracy and positional errors compensation**

**SUMMARY:** This dissertation deals with the adjusting issues at the Computer Numerical Control (CNC) machine tool prototype. Further it follows up possibilities of positional errors compensation using a control system or changes in a machine construction itself. After measuring and evaluating results, the compensative file has been worked out. The measuring has been repeated after inputting compensative data into the control software. Due to compensation, particular cumulative errors range between  $\pm 40\mu\text{m}$ . The total precision of adjusting for the axis X is  $42 \div -73\mu\text{m}$ .

Desetinné třídění:

**Klíčová slova:** přesnost polohování, obráběcí CNC stroje, polohová chyba, chyby obráběcích strojů,

**Keywords:** positioning, CNC machine tools, positional error, machine tools error

Zpracovatel: TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra výrobních systémů

Dokončeno: 2011

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 27.5.2011

Podpis:

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval touto cestou vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Zelenému, Ph.D., za odborné vedení při vytváření této práce, zodpovězení mých dotazů, cenné rady a za jeho trpělivost. Také bych rád poděkoval Prof. Ing. Janu Skallovi, CSc., který mi poskytl několik dobrých rad a nápadů.

Také velice děkuji všem, kteří mě po celou dobu studia podporovali a pomáhali mi.

## Obsah:

|   |    |
|---|----|
| Seznam použitých zkratk a symbolů                                 | 8  |
| 1 Úvod  | 9  |
| 2 Cíl diplomové práce   | 10 |
| 3 Přesnost polohování CNC strojů                                  | 11 |
| 3.1 Klasifikace chyb obráběcích strojů                            | 12 |
| 3.2 geometrická přesnost  | 14 |
| 3.3 Přesnost pracovního prostoru                                  | 14 |
| 3.4 Přesnost polohování lineárních a rotačních os                 | 15 |
| 3.5 Přímosti os   | 16 |
| 3.6 Úhlové odchylky   | 17 |
| 3.7 Přesnost diagonálního přestavení                              | 17 |
| 3.7.1 Vektorová metoda  | 17 |
| 4 Odměřování  | 20 |
| 4.1 Rozdělení odměřování z hlediska informace o poloze            | 22 |
| 4.2 Rozdělení odměřování z hlediska získávání informace o poloze  | 25 |
| 5 Další způsoby odměřování  | 26 |
| 5.1 Odměřování přes převod  | 26 |
| 5.2 Optické odměřování  | 26 |
| 5.3 Magnetické odměřování   | 27 |
| 6 Kontrola přesnosti CNC obráběcích strojů                        | 28 |
| 6.1 Způsoby kontroly přesnosti CNC strojů                         | 28 |
| 6.2 Metodika zkoušek přesnosti polohování                         | 28 |
| 6.3 Přesnost stroje pomocí tříd IT                                | 32 |
| 7 Popis konstrukce prototypu obráběcího CNC stroje                | 34 |
| 8 Zkoušky pro určení přesnosti polohování na prototypu CNC stroje | 37 |
| 8.1 Měření tuhosti konstrukce                                     | 37 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 8.2  | Měření na zjištění citlivosti os  | 37 |
| 8.3  | Měření přímosti os  | 38 |
| 8.4  | Měření hystereze na osách   | 38 |
| 8.5  | Měření úhlové odchylky  | 38 |
| 8.6  | Měření součtové chyby   | 39 |
| 8.7  | Kompenzace polohových chyb  | 39 |
| 9    | Měření přesnosti polohování na prototypu CNC stroje   | 40 |
| 9.1  | Metodika měření součtové chyby  | 40 |
| 9.2  | Metodika měření hystereze na osách  | 42 |
| 10   | Měření polohové přesnosti prototypu CNC stroje a kompenzace<br>polohových chyb                | 43 |
| 10.1 | Praktické měření hystereze na osách   | 43 |
| 10.2 | Kompenzace hystereze  | 45 |
| 10.3 | Měření hystereze po zadání kompenzačních dat pro součtovou chybu,<br>bez kompenzace hystereze | 46 |
| 10.4 | Praktické měření součtové chyby   | 47 |
| 10.5 | Kompenzace součtové chyby   | 48 |
| 10.6 | Přesnost polohování po kompenzaci součtové chyby  | 50 |
| 10.7 | Přesnost polohování po kompenzaci hystereze, bez kompenzace<br>součtové chyby                 | 51 |
| 11   | Závěr   | 52 |
|      | Použitá literatura  | 54 |
|      | Seznam příloh   | 56 |

## Seznam použitých zkratek

|              |  |
|--------------|--|
| TU           | Technická univerzita                           |
| KVS          | Katedra výrobních systémů                      |
| CNC          | Computer numerical Control                     |
| x,y,z        | kartézský souřadný systém                      |
| ITEM         | Industrietechnik und Maschinenbau              |
| ČSN          | Česká státní norma                             |
| ISO          | International Organization for Standardization |
| ANSI         | American National Standards Institute          |
| ASME         | American Society of Mechanical Engineers       |
| CCD          | Charge-coupled device                          |
| LED          | Light-emitting diode                           |
| $\Delta x_i$ | poloha   |
| $P_i$        | zadaná poloha                                  |
| $B_i$        | necitlivost                                    |
| $S_i$        | odhad běžné nejistoty                          |
| $R_i$        | opakovatelnost                                 |
| A            | přesnost nastavení polohy v ose                |



# 1. Úvod

Každý výrobní stroj je sestaven z několika základních prvků, které zaručují správný a bezporuchový chod. U obráběcích strojů existuje pouze několik modelových prvků, ze kterých výrobci vycházejí a které modifikují. I přesto má každý výrobce nějaká svoje specifická řešení. Požadavky jsou kladeny jak na přesnost, jednoduchou ovladatelnost, ergonomii, spolehlivost, tak i na finanční zhodnocení.

Největším problémem dnešních obráběcích strojů je dosažení a následné dodržování polohových přesností i po několika desítkách či stovkách provozních hodin. Při využití nejmodernějších odměřovacích a polohovacích komponentů se cena takovýchto strojů šplhá do enormních výšin a proto výrobci hledají i méně nákladná řešení jak dosáhnout požadované přesnosti za co nejpříjemnější cenu.

## **2. Cíl diplomové práce**

Prvním cílem této diplomové práce je zpracování metodiky měření přesnosti polohování na prototypu obráběcího CNC stroje, který je umístěn v laboratořích KVS dle mezinárodních pravidel a postupů.

Druhým cílem této práce je provést samotná měření pro ujištění přesnosti polohování. Na základě vyhodnocení naměřených výsledků navrhnout a provést úpravy (softwarové, nebo konstrukční), vedoucí ke zlepšení polohování prototypu CNC stroje. Po provedených úpravách je nutno provést měření znovu a zhodnotit, jaké měli provedené úpravy dopad na celkovou polohovou přesnost stroje.

### 3. Přesnost polohování CNC strojů

Stále tvrdší konkurence mezi jednotlivými výrobci a prodejci obráběcích CNC strojů, vytváří stále větší tlak na dodržování a opakovanou přesnost i těch nejpřísnějších tolerancí při obrábění. V dnešní době, se díky vývoji moderních odměřovacích systémů a možnosti kompenzace geometrických chyb pomocí řídicího systému stroje, stávají největším problémem chyby přímocarosti pohybu a kolmosti mezi osami. Velký důraz je také kladen na přesnost interpolací.

Ve většině případů je možno rozdělit chyby obráběcích strojů do pěti druhů [22]:

- Geometrické chyby struktury a jednotlivých dílů stroje
- Chyby zapříčiněné teplotní deformací
- Chyby způsobené řeznými silami
- Chyby v servopohonu
- Algoritmické chyby při interpolacích

Přesnost je jedním z nejdůležitějších parametrů stroje, ať pracuje v manuálním, poloautomatickém, nebo plně automatickém režimu. Pod přesností se rozumí schopnost dodržení relativní polohy obrobku a nástroje v jakémkoliv místě pracovního prostoru. Pracovní prostor je určen velikostí posuvu v jednotlivých souřadnicových osách. Hlavní snahou se tedy stává přesné proměření stroje v celém pracovním prostoru a odhalení maximálního množství odchylek a stanovení jejich příčiny.

Pro určení přesnosti CNC strojů jsou kladeny velice vysoké nároky na takzvanou přesnost polohování. To znamená přesnost nastavení výsledné polohy mezi obrobkem a nástrojem v jednotlivých souřadných osách. Tato přesnost je ovlivňována především použitým odměřovacím zařízením spolu ve spojení s vlastnostmi použitých pohonů a vodících ploch. Hlavní opakující se vliv na přesnost polohování souřadnic má přesnost použitého odměřovacího zařízení (kuličkový šroub nebo hřeben/pastorek ve spojení se snímačem u lineárních pohonů, šnek/šnekové kolo se snímačem u otočných pohonů, indukotosyn, optické měřítka ...).

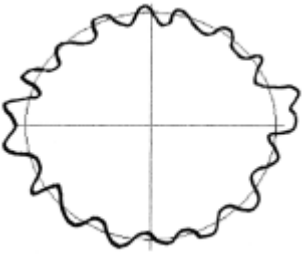
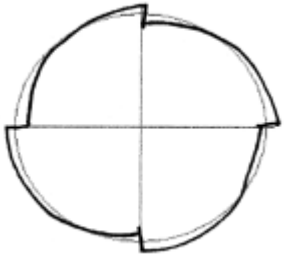
Pro dosažení co nejvyšší přesnosti polohování je u CNC strojů používáno přímé odměřování s vysokou výslednou přesností (induktosyny, optická měřítka) a s co

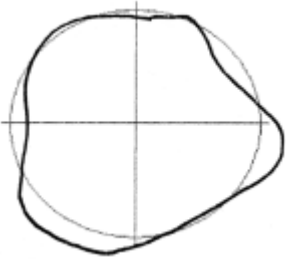
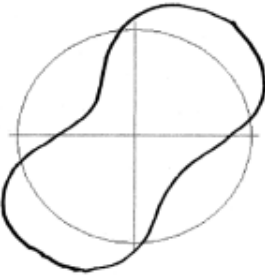
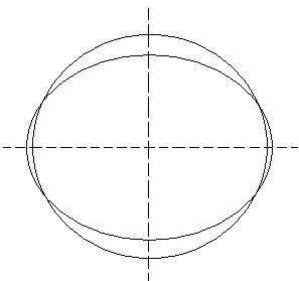
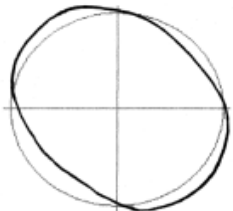
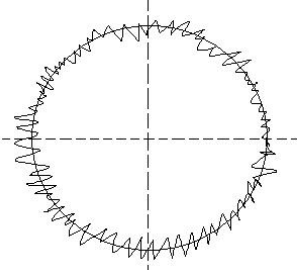
nejmenším odměřovacím krokem. V dnešní době se velikost kroku pohybuje v rozmezí 0,01 – 0,001 mm. V součinnosti s velice přesným odměřováním je však nutno také používat velice přesné pohony posuvů a vodící plochy s dobrými kluznými vlastnostmi. Nejčastěji se využívají kluzná vedení, která jsou navíc ošetřena třecí hmotou, která minimalizuje trhavé pohyby a navíc i snižuje koeficient tření. V tomto směru jsou jako nejlepší vedení s ohledem na přesnost polohování vedení valivá.

Přesnost polohování jednotlivých souřadných os však není zárukou přesného nastavení polohy mezi obrobkem a nástrojem v celém pracovním prostoru. Tato pracovní přesnost je z části ovlivněna i přesností pohybů jednotlivých částí, to znamená přesností geometrickou. [5]

### 3.1 Klasifikace chyb obráběcího stroje

Pro rozměrovou přesnost částí vyrobených pomocí obráběcích CNC center jsou rozhodující přesnost a dobré obráběcí podmínky. Výsledný tvar obrobku je nejvíce ovlivňován různými chybami stroje (vůle, změna směru, chvění, nekolmosti os atp.). Každý typ chyby můžeme získat pomocí interpolace kružnice. To znamená, že chyby, které získáme měřením obrobené kružnice, porovnáme se žádanou ideální kružnicí. Celkově jsou chyby seřazeny podle sedmi vzorů, které jsou uvedeny v následující tabulce 1.

|                |   |  |
|----------------|---|--|
| Cyklická chyba |  | Cyklická chyba je definovaná jako zvlnění podél celého obvodu kruhu. Zvlnění mění frekvenci a dosahuje maximální amplitudy v jedné ose. Cyklické chyby jsou typické pro excentrický kuličkový šroub, nebo excentrické odměřování.  |
| Vůle           |  | Vůle vzniká při opotřebení kuličkového šroubu, spojky, nebo ložiska a má za následek mrtvý chod po vodící dráze stroje. Mrtvý chod se zobrazí v kružnici jako schod podle jedné osy. Vnější schod předpokládá chybu v řízení systémů, zatímco vnitřní schod označuje hysterezi v CNC encoderu. |

|                              |   |   |
|------------------------------|---|---|
| Nerovnost                    |    | Chyba vznikne při ohybu, průhybu, nebo sklonu osy vedení.   |
| Chybné nastavení servopohonů |    | Jedna osa servopohonu má jiné nastavení než druhá osa, pak není možné vytvořit přesnou kruhovou interpolaci. Chyba je indikovaná oválným tvarem kruhového diagramu chyb, nakloněným pod úhlem 45°. U moderních CNC center se téměř nevyskytuje.   |
| Chyby spojitosti stupnice    |   | Chyby spojitosti stupnice jsou typické u chybného stoupání kuličkového šroubu, nebo nesprávné kompenzace vodícího šroubu. Chyby se zobrazují jako oválný diagram deformovaný podle jedné osy. Např. neodpovídá stupnice osy x, kdy se osa x posune příliš daleko, nebo osa y se neposune dostatečně daleko. |
| Nepravoúhlost os             |  | Osy x a y nejsou navzájem kolmé, z kruhu se stává ovál. Ve srovnání s chybou servopohonu, tato pravoúhlá chyba zůstává ve stejném postavení nehlédě na směr obrábění.   |
| Náhodná vibrace              |  | Zvlnění, které mění náhodně frekvenci a amplitudu se označuje jako náhodné vibrace, vyvolané prostředím nebo strojem, například opotřebením ložiska.  |

Tab. 1 - Chyby obráběcích strojů [21]

## 3.2 Geometrická přesnost

Celková chyba prostorové přesnosti polohování se skládá ze součtu nepřesností jednotlivých os systému. Pro každou osu je možno definovat šest základních chyb. Jedná se o odchylky polohy ve směru pohybu, dále o chybu přímosti jak horizontální tak vertikální a nakonec ještě o tři chyby úhlové (naklonění, natáčení a klopení). Pro obráběcí centrum se třemi lineárními osami se tedy jedná o 18 polohových chyb. K tomuto číslu je ještě nutno připočítat další tři chyby, které způsobují nekolmosti mezi jednotlivými dvojicemi os ( $Oxy$ ,  $Oxz$ ,  $Oyz$ ). Pro uvažovaný obráběcí stroj se třemi lineárními osami se tedy musí uvažovat 21 polohových chyb. Toto číslo je správné pouze, pokud uvažujeme všechny součásti stroje za dokonale tuhé. [21]

## 3.3 Přesnost pracovního prostoru

Pracovní přesnost je v převážné většině případů hodnocena výrobou zkušební dílu nebo určené série dílů. Během seřizování stroje se měří přesnost polohování souřadnicových os CNC stroje. Výsledek tohoto měření polohování nám již před pracovními zkouškami hodně napoví o pracovní přesnosti CNC stroje. Velkou výhodou tohoto měření je možnost využití výsledků k vytvoření kompenzačních souborů dat, které zvýší pracovní přesnost stroje.

K samotnému měření se v převážné většině případů používají laserinterferometry. Odražeč je obvykle umístěn v místě nástroje a laserový zdroj spolu s interferometrem je umístěn mimo stroj, popřípadě přímo na pracovním stole stroje. Odchylky, které byly naměřeny při základním polohování, jsou odchylky platné pro danou konfiguraci stroje při měření. Velikost těchto odchylek je v každém místě měření různá a záleží na dvou skupinách chyb. Jedná se o chyby lineární a úhlové. Poměr úhlových a lineárních chyb bude vzrůstat úměrně se vzdáleností od počátku souřadného systému stroje. Během měření polohování bude výsledek záviset na prostorové konfiguraci odražeče a interferometru vůči tomuto bodu. Odchylky se měří přesně na úrovni paprsku laseru.

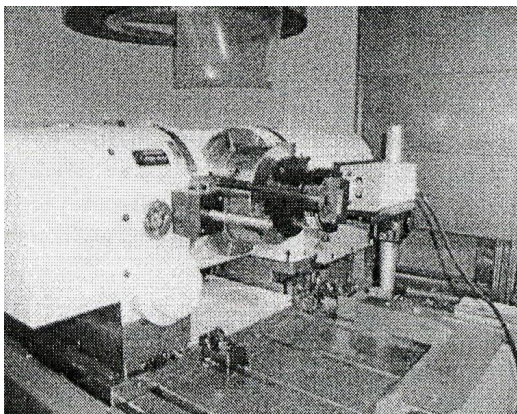
Pro znalost geometrické nepřesnosti v každém místě pracovního prostoru je třeba použít metody „Přesnost pracovního prostoru“ (v originále „Volumetric

Performance“) podle americké normy ANSI/ASME B5.54, nebo podle evropské normy ČSN ISO 230-2 až 230-6 takzvanou volumetrickou metodou. Podle obou norem jsou měřeny odchylky ve směru prostorové diagonály nebo prostorových diagonál. Diagonály byly zvoleny proto, že v jejich nepřesnostech jsou promítnuty všechny ostatní geometrické chyby. Během měření pomocí volumetrické metody probíhá polohování sekvenčně ve všech lineárních osách stroje a navíc ve čtyřech odlišných prostorových diagonálách vedených pracovním prostorem stroje. Následným vyhodnocením naměřených údajů je možno získat celkem přesnou představu o prostorové přesnosti polohování stroje. Volumetrickou metodu měření lze aplikovat i při použití běžných měřících aparatur a to postupným posouváním laserového interferometru do několika různých poloh pracovního stroje.[12]

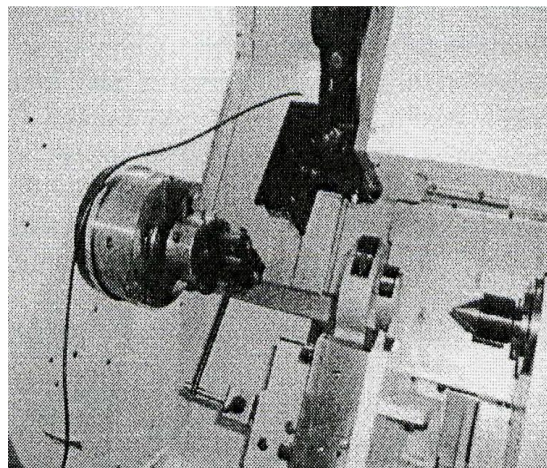
### **3.4 Přesnost polohování lineárních a rotačních os**

Pro vyhodnocování přesnosti v lineárních osách se u číslicově řízených obráběcích strojů stalo využívání laserových interferometrů. Při měření přesnosti polohování je využívána jednopaprsková laserová hlava, která je při vlastním měření umístěna na nepohyblivé části stroje. Na pohyblivou část stroje se připevňuje odrazové zrcátko, které vrací paprsek zpět do laserové hlavy. K vyhodnocení všech získaných údajů o doměřované vzdálenosti dochází v připojeném analyzátoru. Opakující se průběhy naměřených odchylek, poukazují na chyby, způsobené konstrukčními uzly stroje. Pokud dojde k nesouhlasu požadavků na přesnost stroje spolu s naměřenými daty, je možno v řídicím systému stroje provést softwarovou kompenzaci naměřených odchylek. Tímto řešením je možno zpřesnit polohovou přesnost dané měřené osy, bez nutnosti konstrukčních zásahů.

Zcela jiný přístup měření přesnosti polohování je nutno použít u rotačních os. Jelikož je funkce rotačních os při obrábění zcela rovnocenná s lineárními osami, je tedy nutno i zde klást stejně přísné nároky na přesnost polohování. Při samotném měření se nejčastěji využívá dvoupaprsková laserová hlava v kombinaci se speciálním rotačním měřícím stolek, na kterém je umístěn dvojité kotoučový odražeč. Měření se může provádět nejen na vodorovných nebo svislých obráběcích centrech, ale také na CNC soustruzích, které jsou vybaveny řízenou osou C.[1],[2],[5],[9]



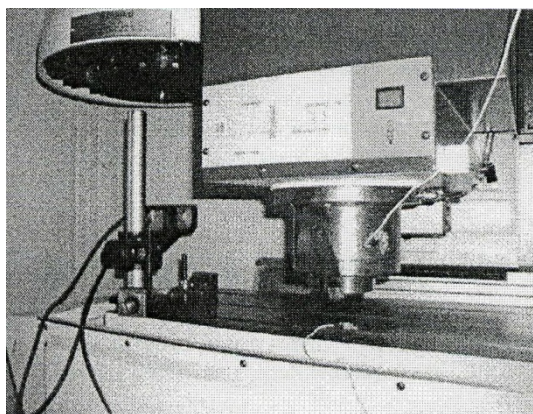
*Obr. 2 Měření přesnosti polohování rotačního stolu[1]*



*Obr. 3 Měření přesnosti polohování osy C soustruhu[1]*

### **3.5 Přímosti os**

U přesných obráběcích CNC center je také nutné změřit a popřípadě kompenzovat přímosti jednotlivých os. Toto je nutno z hlediska, že u každé pohybové osy se vyskytuje chyba přímosti jak v horizontální, tak ve vertikální rovině. Při měření těchto chyb se využívá několika měřidel a měřících postupů. Nejčastěji se využívá CCD kamera, jejíž hlavní předností je schopnost měřit obě dané osy při jednom nastavení. Další z možností je použití dvoupaprskového laseru, který se používá v kombinaci se zvláštním příslušenstvím. U tohoto zařízení je ovšem nevýhoda v měření přímosti pouze jedné osy.



*Obr. 4 Měření přímosti osy X svislého centra pomocí CCD kamery[1]*



### 3.6 Úhlové odchylky

Každá pohybová osa je zatížena třemi úhlovými chybami. Vždy se jedná o natočení okolo zbývajících dvou os souřadného systému a o natočení okolo vlastní osy. Odchylku natočení okolo vlastní osy nemusíme uvažovat pouze v případě osy Z u obráběcích center, kde způsobuje natočení nástroje. Samotné měření úhlové odchylky je prováděno pomocí dvoupaprskového laseru doplněného o úhlovou optiku, nebo také pomocí dvojice přesných vodovah.[1],[2],[5],[9]

### 3.7 Přesnost diagonálního přestavení

Při obrábění tvarově složitých a náročných dílů dochází k polohování při součinnosti dvou i více řízených os. Tento stav se z hlediska vyhodnocování odchylek nazývá měření přesnosti diagonálního přestavení. Měření se provádí pomocí laserové hlavy, která je doplněna o úhlově stavitelné zrcátko a ploché odrazové zrcadlo. Samotné měření spočívá v měření přesnosti polohování podél prostorových, případně rovinných diagonál vedených napříč pracovním prostorem stroje. Získané výsledky nám udávají tzv. volumetrickou (volumetrie – odměrná analýza) přesnost obráběcího stroje. Speciálním způsobem zpracování diagonálních měření je vektorová metoda. Rozdíl spočívá v aplikaci sekvenčního pohybu X-Y-Z podél měřených diagonál. Stroj postupně provádí polohování po definovaných úsecích ve směru osy X, následně osy Y a nakonec osy Z. Tento postup se několikrát opakuje v rámci plné délky zvolené diagonály. Výsledkem je několika násobně větší počet měřených bodů, které se dají matematicky přepočítat na odchylky v jednotlivých směrech souřadných os. Dále jsou z těchto údajů také vypočteny kolmosti mezi jednotlivými osami.

#### 3.7.1 Vektorová metoda

Při měření se nejčastěji používá laserinterferometru. Paprsek se nastaví paralelně s pohybem osy a odchylka polohy osy se měří po zvolených úsecích pohybové dráhy. Protože směr měření je paralelní s dráhou pohybu osy, není toto uspořádání schopno zachytit chyby přímosti pohybu, které se projevují na kolmici k dráze a k paprsku.

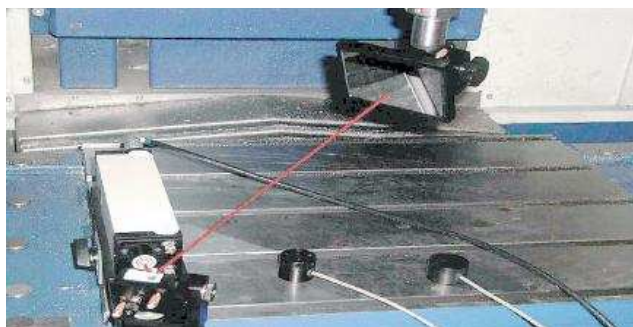
Kromě toho je výsledek měření platný pouze pro zvolenou polohu laserinterferometru, kterou je obvykle osa kuličkového šroubu.

Princip měření pomocí vektorové metody spočívá v tom, že směr paprsku laseru není paralelní s pohybem lineárních os. Z tohoto důvodu jsou naměřené odchylky velice citlivé na kolmé i paralelní chyby. To znamená, že měřené lineární chyby jsou vektorovým součtem chyb polohových (paralelní k ose), vertikálních chyb přímosti pohybu osy (kolmý směr k ose) a chyb přímosti v horizontální rovině (kolmé k ose a vertikální přímosti). Protože lineární chyby všech tří řízených os jsou vektorovým součtem tří kolmých vektorových složek, nazývá se tato metoda vektorová.

Při samotném měření se nejprve zaměří laserový paprsek ve směru jedné diagonály, stejně jako při měření délek diagonál. Namísto toho, aby se pohybovali současně ve směrech os  $x$ ,  $y$ ,  $z$  k následujícímu bodu  $R$  ležícímu na diagonále, tak se pohybujeme sekvenčně, tzn., že nejprve se pohybujeme v ose  $x$  do bodu  $X_1$ , následně v ose  $y$  do bodu  $Y_1$  a nakonec v ose  $z$  do bodu  $Z_1$ . Úsek ujetý od počátku do bodu  $R$  diagonály se vypočte jako odmocnina ze součtu kvadrátů všech úseků na osách. Pořadí os je možno zaměnit. Údaj o poloze bodu  $X$  je ovlivněn pouze kvalitou této osy. Stejně tak údaje o  $Y$  a  $Z$ . Proto je možné vypočítat chyby polohování odděleně v každé ose. Měření pokračuje ustavením laseru postupně ve směrech zbývajících tří diagonál pracovního prostoru stejným způsobem. Z každého měření získáme 3 sady dat, takže celkem máme k dispozici 12 souborů. To stačí k výpočtu 3 chyb polohy a 6 chyb přímosti.

Konvenční metoda a interferometr se dají použít pouze k měření ve směru diagonály, protože sekvenčním pohybem v osách, kdy trajektorie pohybu není paralelní s diagonálou a odchylka od diagonály je úměrná inkrementům  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , by konvenční laser vykazoval chybu již po ujetí několika mm. Dopplerův jednopaprskový laserinterferometr spolu s plochým zrcadlem toleruje tyto boční odchylky. To proto, že jakýkoli boční pohyb nebo pohyb ve směru kolmém na normálu k povrchu zrcadla nevychýlí laserový paprsek. Tím je stále zaručena souosost laseru. Po třech pohybech se zrcadlo vrátí zpět na diagonálu a je zde tedy pouze podmínka, aby zrcadlo bylo větší než největší naprogramovaný inkrement pohybu v ose. Zrcadlo je upevněno ve vřetenu kolmo na směr paprsku. Nekolmá poloha zrcadla může způsobit chyby měření. Tato chyba je minimalizována seřízením laseru a může být od měření v případě potřeby oddělena.

Ve srovnání s konvenční metodou, kdy se tři osy pohybují současně podél diagonály pracovního prostoru a měří se data po každém ujetém úseku, při vektorové měření se osy pohybují sekvenčně podél diagonály pracovního prostoru a data se měří po každé sekvenci. Dostáváme třikrát více údajů, ze kterých lze separovat chyby každé osy.[26]



*Obr. 5 Měření přesnosti po diagonále[26]*

## 4. Odměřování

Systém odměřování jako celek tvoří jednu z nejdůležitějších částí obráběcího stroje. Jedná se část stroje, která má podstatný vliv na celkovou přesnost obrábění na stroji. Systém odměřování spočívá v počítačovém porovnávání skutečné polohy (většinou nástroje) s požadovanou polohou podle zadání obráběcího programu. Porovnávání je realizováno pomocí zpětné vazby, která je složena z řídicího systému, akčního členu, řízeného prvku a senzoru. Již při psaní programu pro obrábění, zadá programátor nulovou souřadnici stroje a přesnou souřadnici, kde má stroj najet. Obě tyto souřadnice putují přes řídicí jednotku do akčního členu (servo posuv), který začne zadanou rychlostí posouvat vřeteno s upnutým nástrojem směrem k požadované najížděcí souřadnici. Posuv vřetena je neustále sledován snímačem, který předává příslušné informace o okamžité poloze do řídicí jednotky stroje. V okamžiku kdy se bude vřeteno blížit ke koncovému bodu, bude se posuv zpomalovat tak, aby vřeteno s nástrojem dojížděl do koncového bodu tzv. nulovou rychlostí.

Pro volbu vhodného typu odměřování je důležité vybírat podle přesnosti jednotlivých snímačů. Je nevhodné volit snímače s vysokou přesností, pokud budou použity servopohony s velkou řídicí tolerancí (servopohon nebude schopen přesně polohovat ve vysoké vzorkovací frekvenci). Na druhou stranu je při použití snímačů s vysokým rozlišením snazší řízení pohonů, kvůli přesnější informaci o daném pohybu zvláště v nízkých a středních otáčkách.

Při návrhu jednotlivých snímačů je nutné uvažovat také vliv teploty na přesnost odměřování. Čím vyšší teplotě je snímač vystaven, tím větší je teplotní dilatace měřicího pravítka a vznik teplotní chyby je o to větší. [6]

### Řídicí systém

Pod pojmem řídicí systém je myšlena PC stanice, která je vybavena příslušným počtem postprocesorů, které jsou přizpůsobeny pro rychlé a přesné propočítávání souřadnic (jedná se hlavně o souřadnice rádiusů, frézování různých kapes a při řezání závitů). Tato PC stanice pracuje v tzv. předstihu. Prací v předstihu se rozumí to, že PC stanice musí mít propočítány jednotlivé řádky programu se souřadnicemi, které musí

obráběcí nástroj projet. Všechny výpočty se provádějí několik vteřin předtím, než proces obrábění dospěje k příslušnému řádku programu.

### **Akční člen**

Jako akční člen je myšlen hlavní pohon stroje, který pohání vřeteno s upnutým nástrojem. V dnešní době se nejčastěji používají asynchronní nebo synchronní motory s elektrickou komutací. Provedení motoru s elektrickou komutací umožňuje dosahování vyšších výkonů a větších otáček, lepšího chlazení a hlavně vysoké životnosti při minimální náročnosti na údržbu motoru.

Je také možno používat stejnosměrné motory s cizím buzením, které mají ve statoru i rotoru vloženy cívky s pólovými nástavci. Výhody těchto motorů jsou prakticky totožné se synchronními a asynchronními motory, pouze s tím rozdílem, že mají místo elektrického komutátoru, komutátor klasický. Díky velkému pokroku ve vývoji bezkartáčových motorů, se také podíl využití těchto motorů v obráběcích CNC centrech zvyšuje.

### **Řízený prvek**

Pod pojmem řízený prvek je myšlen suport, který je poháněn servopohony, které zajišťují jeho pohyb v potřebných směrech a potřebnou rychlostí. Jedním z příkladů takového spojení servopohonů může být třeba kuličkový šroub (kuličkový šroub slouží k převedení rotačního pohybu na přímočarý). Matice je od kuličkového šroubu oddělena valivými elementy (kuličkami), které obíhají dokola v drážkách šroubu a matice. Valivé elementy mají za úkol snižovat vliv tření a vymezují vůli ve vedení.

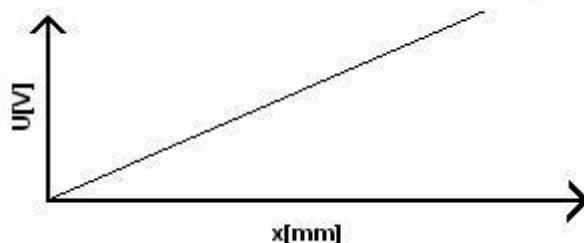
## 4.1 Rozdělení odměřování z hlediska informace o poloze

Samotné odměřování můžeme z hlediska informace o poloze rozdělit do tří základních skupin.[6],[7]

### Absolutní odměřování:

V režimu absolutního odměřování stroj při každé změně souřadnice vychází vždy od nulové souřadnice obrobku. Tzn., že do obráběcího programu jsou zadávány souřadnice bodů, které jsou počítány od nastavené nuly obrobku. Jedinou výhodou této metody je, že pokud nalezneme při obrábění chybu (špatný rádius, nevhodně umístěná drážka atp.) tak stačí opravit pouze jeden příslušný řádek programu.

Jako příklad nejjednoduššího snímače pro absolutní odměřování je možno uvést potenciometr, který pracuje na principu změny elektrického odporu v závislosti na délce. Jedná se o velmi levný a principiálně jednoduchý snímač. Jeho nevýhodou je velmi malá přesnost a spolehlivost.



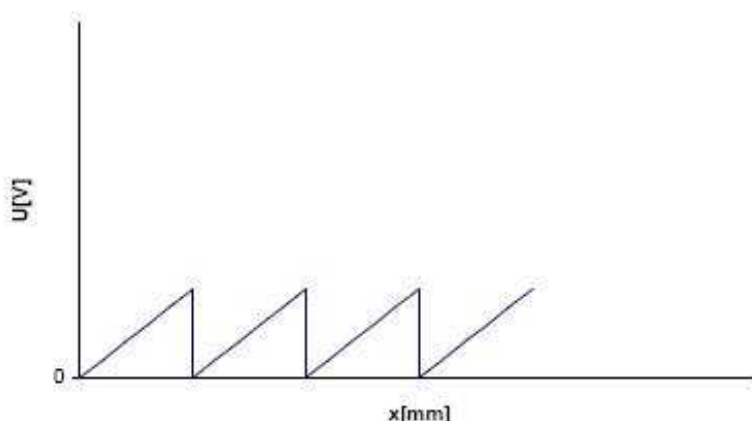
Obr. 6 Zobrazení závislosti napětí na vzdálenosti[6]

### Cyklicky absolutní odměřování:

Cyklicky absolutní odměřování funguje na rotačním principu, kde jedné hodnotě výstupního signálu odpovídá více poloh. V určitém intervalu dráhy suportu je nejprve odměřování absolutní (otáčení o  $360^\circ$ ) a poté se signál bude cyklicky opakovat.

Příkladem snímače pro cyklicky absolutní odměřování je třeba absolutní rotační snímač. Princip tohoto snímače je, že během jedné otáčky je známo absolutní natočení včetně. Nevýhodou je, že snímač nerozlišuje natočení větší jak  $360^\circ$ . Navíc také

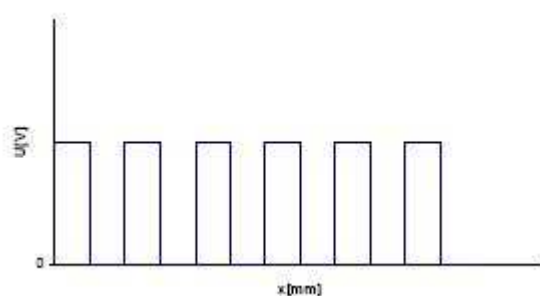
vyžaduje najetí do referenčního bodu. Občas se také jako snímače využívá kruhový potenciometr s kuličkovým šroubem.



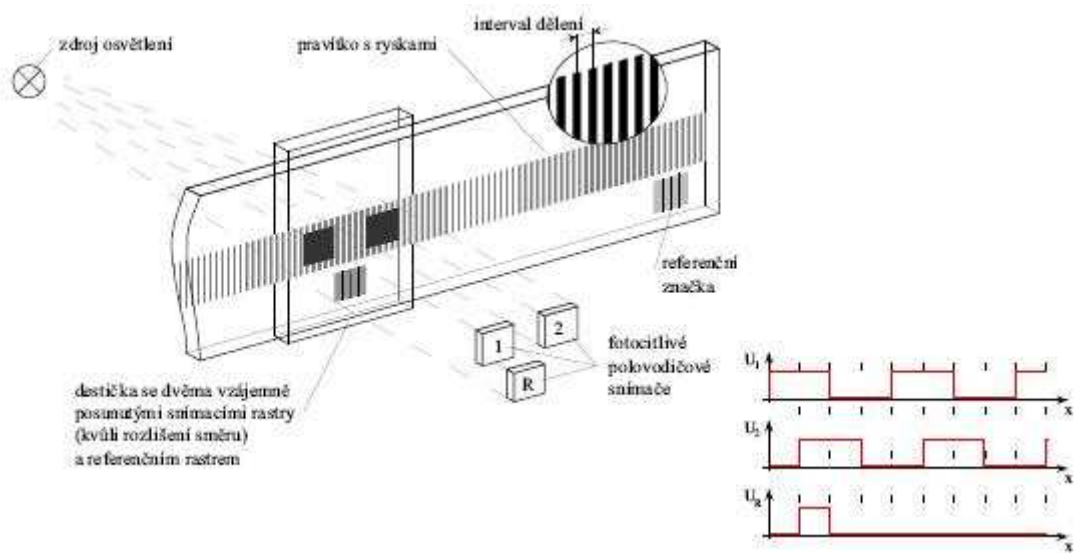
*Obr. 7 Zobrazení závislosti napětí na vzdálenosti u cyklicky absolutního[6]  
Odměřování*

### **Inkrementální odměřování:**

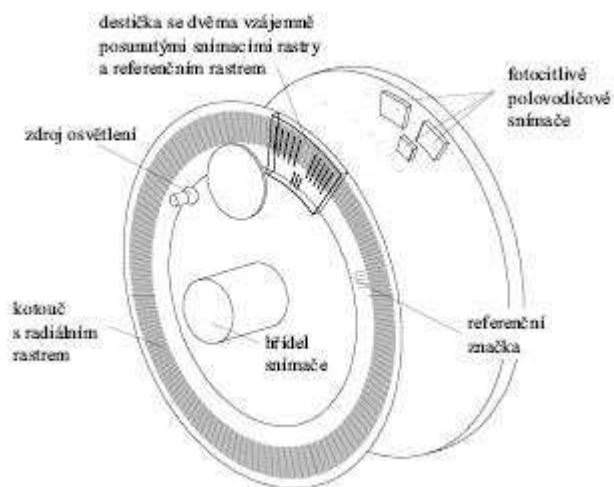
U inkrementálního odměřování se souřadnice neurčují přímo, ale určují se připočítáváním nebo odečítáním příslušné ujeté vzdálenosti vůči předchozímu bodu. Výstupem toho odměřování jsou pouze pulzy. Je proto nutné mít také čítač, který zajistí jejich počítání a následné stanovení příslušné polohy. Kvůli počátečnímu nastavení čítače je opět vyžadováno nejprve najetí do referenční polohy. Další velkou nevýhodou této odměřovací metody je, že pokud je při psaní programu zadána jedna chybná souřadnice, jsou již všechny souřadnice od příslušné chyby posunuty právě o velikost dané chyby. I přes tyto nevýhody se dnes jedná pravděpodobně o nejrozšířenější způsob odměřování.



*Obr. 8 Zobrazení závislosti napětí na vzdálenosti u inkrementálního odměřování[6]*



Obr. 9 Zobrazení funkce přímého inkrementálního snímače[6]



Obr. 10 Zobrazení funkce rotačního inkrementálního snímače[6]



Obr. 11 Zobrazení praktického provedení snímače[6]

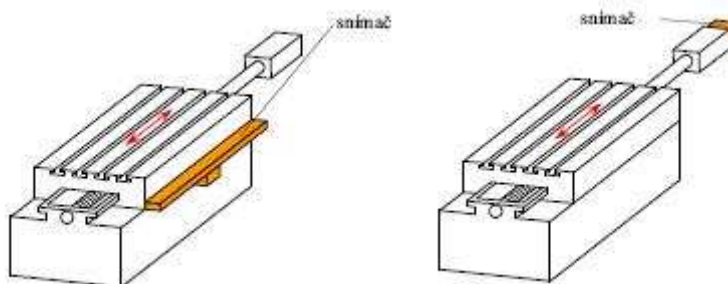


## 4.2 Rozdělení odměřování z hlediska získání informace o poloze

### Přímé odměřování:

Snímač pracuje na principu přímého odměřování polohy. Při lineárním odměřování roste s délkou snímače i jeho cena. Nevýhodou je, že teplotní dilatace ovlivňuje přesnost měření a dá se jen obtížně zakrytovat a tím vliv teploty na snímač snížit. Přímé odměřování má obvykle vyšší přesnost oproti nepřímému odměřování a proto je využíváno převážně u přesnějších strojů.

Další možností je snímač pevně připojit ke vřetení. Tím bude přesnost odměřování dána pouze přesností snímače a další vlivy negativně ovlivňující odměřování se tudíž nebudou projevovat. Velkou výhodou je jednoduchá konstrukce, kdy se snímač pouze připevní na stroj a nemusí se navrhovat další součásti nutné pro chod odměřování. Při použití průchozího vřeten se použije odměřování s prstencem, který se upevní na vřeteno. Při použití tohoto konstrukčního řešení je nevýhodou vyšší cena nežli při použití klasického IRC snímače. Také je možno narazit na konstrukční problém s umístěním na rotační prvek, kde je nutno vhodně umístit přesnou kuželovou nebo válcovou plochu tabulkového rozměru snímače.[6],[7]



Obr.12 Zobrazení přímého odměřování[6] Obr.13 Zobrazení nepřímého odměřování[6]

### Nepřímé odměřování:

U nepřímého odměřování se ujetá vzdálenost měří nepřímo. Poloha se počítá ze změřeného úhlu natočení a ze stoupání šroubu. Toto měření výrazně ovlivňuje chyba stoupání šroubu. Tato nevýhoda je však vyvážena nízkou cenou samotných snímačů a velmi jednoduchého krytování (v drtivé většině případů je snímač zabudován přímo do pohonu). Díky tomu se tento způsob odměřování využívá ve většině dnešních CNC strojů.

## 5. Další způsoby odměřování

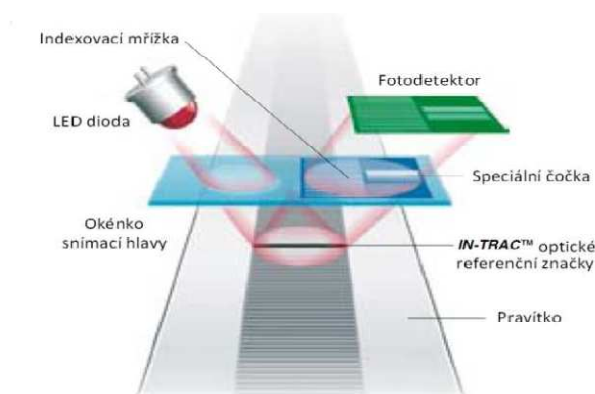
### 5. 1 Odměřování přes převod

Aktuální poloha je přenášena z vřetena pomocí převodu na snímač. Při volbě vhodného převodového poměru je možno docílit velice přesného odměřovacího kroku i pro snímače s menší přesností odměřování. Snímač také můžeme umístit mimo osu samotného vřetena, což je velmi důležité pro zachování průchodnosti vřetenem.

Samotný převod je nejčastěji proveden pomocí ozubeného řemene. Ozubený řemen se volí především proto, že nepřenáší žádný krouticí moment, proto není namáhán a nedochází k jeho protahování vlivem elasticity řemenu. Velkou výhodou při tomto typu odměřování je možnost použití klasických IRC rotačních snímačů polohy. Jedinou nevýhodou je vznik chyby při odměřování vlivem částečných nepřesností při výrobě ozubených řemenic, popřípadě vlivem průhybu řemene, při nedostatečném napnutí.[7]

### 5. 2 Optické odměřování

Na snímací plochu jsou nanášené optické značky. Aktuální polohu určují čtecí hlavy, které tyto značky snímají. Přesnost čtení je závislá na kvalitě snímání, pokud jsou optické značky znečištěné (například chladicí emulzí, třískami, prachem...) může docházet k chybám měření. Princip činnosti snímače je zachycen na obrázku. LED dioda osvětluje měřicí pravítko. Světlo se odráží od referenčních značek, prochází speciální čočkou a dopadá na fotodetektor.

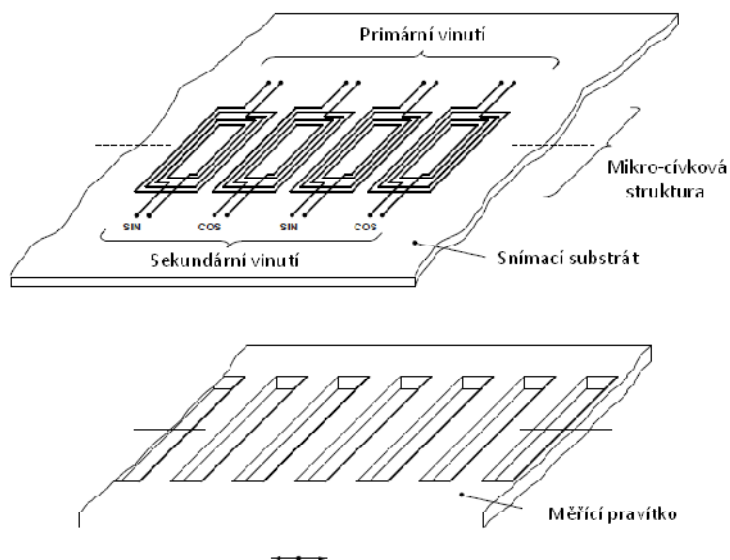


Obr. 14 Schéma optického odměřování[7]

### 5. 3 Magnetické odměřování

Principem magnetického odměřování je využití střídavě polarizované magnetické stopy. Snímací prvky jsou tvořeny magnetorezistory (hallové prvky), které generují harmonický signál podobně jako snímače optické. Výhodou pro použití této metody je, že magnetická stopa může být nanесena na jakoukoliv nefunkční plochu stroje (např. obvod kroužku ložiska), nebo může být realizována pomocí nalepovací magnetické pásky. Proto se jedná o konstrukčně velice jednoduché a úsporné řešení. Takto realizované snímače jsou velmi odolné vůči měřícím nepřesnostem, které by mohli být způsobeny znečištěním magnetického pásku.

Samotné magnetické odměřování funguje velice jednoduše. Stopy měřícího pravítka tvoří uzavřený magnetický obvod mezi primárním a sekundárním vinutím, tím se v sekundárních cívkách indukuje napětí a cívkami začne protékat proud.



Obr. 15 Schéma magnetického odměřování[7]

## **6. Kontrola přesnosti CNC obráběcích strojů**

Dosavadní způsoby kontroly přesnosti obráběcího stroje využívá v drtivě většině případů měření geometrické přesnosti, které je citováno v průmyslových normách většiny států. Tyto zkoušky přesnosti tvaru a polohy jednotlivých strojních částí a uzlů jsou dostačující pro konvenční stroje nebo stroje s nepružnou automatizací, ale jsou zcela nedostatečné pro posouzení přesnosti polohování CNC strojů. Uživatele stroje, ale zajímá odpověď na otázku, jaká je relativní odchylka polohy nástroje vůči obrobku v celém rozsahu pracovního prostoru stroje při zahrnutí všech vlivů, které na stroj během pracovního procesu působí.

### **6.1 Způsoby kontroly přesnosti CNC strojů**

Celosvětová jednotná kontrola pro měření přesnosti polohování prozatím není ustanovena, ale přední výrobci obráběcích CNC strojů a center postupují při kontrolách přesnosti polohování přibližně stejně.

Nejčastější kontrolou je kontrola odchylky mezi naprogramovanou a posléze skutečnou polohou nástroje vůči obrobku při chodu stroje naprázdno. Tato odchylka je měřena odděleně v každé ose zvlášť. Tuto metodu je však možno připustit pouze za předpokladu, že byla předtím provedena zkouška geometrické přesnosti, při které byla kontrolována vzájemná poloha souřadnicových os. Při kontrole strojů se souvislým řízením musí být zkouška doplněna kontrolou vazby mezi dvěma a více souřadnicemi. Velkou nevýhodou je, že výsledek měření je závislý na umístění měřících zařízení v pracovním prostoru stroje.[8],[9]

### **6.2 Metodika zkoušek přesnosti polohování**

Podle americké normy ANSI/ASME B5.54, ale i podle evropské normy ČSN ISO 230-2 až 230-6, se kontrola polohování CNC strojů (kontrola přesnosti polohování souřadnic) musí provádět pro každou řízenou osu zvlášť a to u všech systémů řízení (systém pro stavění souřadnic, systém pravoúhlého řízení a systém svislého řízení). Během kontroly přesnosti polohování se zjišťuje rozdíl mezi skutečnou a naprogramovanou polohou nástroje vůči obrobku v předem zvolených bodech

jednotlivých souřadnicových osách stroje. Vzhledem k tomu, že přesnost polohování je jedním z nejdůležitějších ukazatelů přesnosti CNC stroje, věnuje se její kontrole zvýšená pozornost. Na rozdíl od většiny ostatních měření a kontrol se měření přesnosti polohování provádí při několikanásobném opakování měření a výsledky se musí vyhodnocovat statisticky, aby byl s určitou pravděpodobností připuštěn i vliv náhodných chyb, které ovlivňují měření. Nejčastěji se měření opakuje v rozsahu 5 – 10 měření za stejných podmínek. Za předpokladu, že jsou náhodné chyby rozloženy rovnoměrně podle Gaussovy křivky (charakterizuje rozložení výsledků měření s ohledem na referenční hodnotu), tak poté z naměřených hodnot lze dopočítat polohové odchylky v jednotlivých souřadnicových osách. Jelikož zpracování výsledků pouze pěti nebo deseti měření (v každém bodě měření) není ani při statistickém zpracování dostatečné, doporučuje se ještě navíc provádět výpočet polohové odchylky (odhad běžné nejistoty) vždy v jednom směru (kladném i záporném). Tuto vypočtenou polohovou odchylku je vždy nutno vztahovat k celé měřené ose. V krajních polohách se uvažují výsledky pouze dvou krajních bodů. Při výpočtu se vychází z naměřených hodnot (pro ukázkou jsou uvedeny v tabulce č. 2), které se dosadí do následujících vzorců[16]:

- Odchylka polohy

$$x_{ij} = P_{ij} - P_i \quad (1)$$

Kde:  $P_i$  - zadaná poloha

$i$  – jedna určitá poloha ze všech zadaných poloh

$P_{ij}$  - skutečná poloha najetí

$j$  –  $j$ -té nastavení  $i$ -té polohy

- Průměrná jednosměrná odchylka polohy

$$x_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (2)$$

Kde:  $n$  – celkový počet najetí

- Průměrná dvousměrná odchylka polohy

$$x_j = \frac{x_i^{\uparrow} + x_i^{\downarrow}}{2} \quad (3)$$

- Odhad běžné nejistoty

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} - x_i)^2} \quad (4)$$

| Zadaná<br>poloha Pt<br>(mm)                                    | 8,250                  |            | 21,500      |           | 53,000      |            | 89,500      |           | 106,000    |            | 143,500     |            | 168,000     |            | 184,500     |            |
|--|------------------------|------------|-------------|-----------|-------------|------------|-------------|-----------|------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|
| Smysl<br>najeť<br><br>Polohové<br>úchyly<br>(mm)               | ↓                      | ↑          | ↓           | ↑         | ↓           | ↑          | ↓           | ↑         | ↓          | ↑          | ↓           | ↑          | ↓           | ↑          | ↓           | ↑          |
|  | -0,195                 | -0,025     | -0,25       | 0,01      | -0,32       | 0          | -0,41       | 0,03      | -0,425     | -0,015     | -0,445      | -0,115     | -0,45       | -0,15      | -0,49       | -0,2       |
|  | -0,195                 | -0,025     | -0,245      | 0,01      | -0,32       | 0,005      | -0,4        | 0,03      | -0,42      | -0,1       | -0,445      | -0,115     | -0,45       | -0,145     | -0,49       | -0,195     |
|  | -0,2                   | -0,025     | -0,25       | 0,005     | -0,32       | 0          | -0,41       | 0,03      | -0,425     | -0,015     | -0,445      | -0,115     | -0,45       | -0,14      | -0,49       | -0,195     |
|  | -0,195                 | -0,015     | -0,25       | 0,005     | -0,325      | 0          | -0,41       | 0,035     | -0,43      | -0,015     | -0,44       | -0,155     | -0,45       | -0,14      | -0,49       | -0,2       |
| Průměrná<br>jednosměr-<br>ná<br>polohová<br>úchylna Xi<br>(mm) | -0,21                  | -0,02      | -0,255      | 0,005     | -0,32       | 0          | -0,415      | 0,035     | -0,425     | -0,015     | -0,445      | -0,11      | -0,45       | -0,14      | -0,485      | -0,2       |
|  | -0,199                 | -0,022     | -0,25       | 0,007     | -0,321      | 0,001      | -0,409      | 0,032     | -0,425     | -0,032     | -0,444      | -0,122     | -0,45       | -0,143     | -0,489      | -0,198     |
|  | 6,52E-03               | 4,47E-03   | 3,54E-03    | 2,74E-03  | 2,24E-03    | 2,24E-03   | 5,48E-03    | 2,74E-03  | 3,54E-03   | 3,80E-02   | 2,24E-03    | 1,86E-02   | 0,00E+00    | 4,47E-03   | 2,24E-03    | 2,74E-03   |
|  | 1,30E-02               | 8,94E-03   | 7,07E-03    | 5,48E-03  | 4,47E-03    | 4,47E-03   | 1,10E-02    | 5,48E-03  | 7,07E-03   | 7,60E-02   | 4,47E-03    | 3,71E-02   | 0,00E+00    | 8,94E-03   | 4,47E-03    | 5,48E-03   |
|  | -0,2120384             | -0,0309443 | -0,2570711  | 0,0015228 | -0,3254721  | -0,0034721 | -0,4199545  | 0,0265228 | -0,4320711 | -0,1080263 | -0,4484721  | -0,1591484 | -0,45       | -0,1519443 | -0,4934721  | -0,2034772 |
| Jednosměr-<br>ná<br>opakovatel-<br>nost<br>Ri=4Si<br>(mm)      | -1,86E-01              | -1,31E-02  | -2,43E-01   | 1,25E-02  | -3,17E-01   | 5,47E-03   | -3,98E-01   | 3,75E-02  | -4,18E-01  | 4,40E-02   | -4,40E-01   | -8,49E-02  | -4,50E-01   | -1,34E-01  | -4,85E-01   | -1,93E-01  |
|  | 2,61E-02               | 1,79E-02   | 1,41E-02    | 1,10E-02  | 8,94E-03    | 8,94E-03   | 2,19E-02    | 1,10E-02  | 1,41E-02   | 1,52E-01   | 8,94E-03    | 7,43E-02   | 0,00E+00    | 1,79E-02   | 8,94E-03    | 1,10E-02   |
|  | -0,177                 |            | -0,257      |           | -0,322      |            | -0,441      |           | -0,393     |            | -0,322      |            | -0,307      |            | -0,291      |            |
|  | 0,166008662            |            | 0,250725853 |           | 0,317527864 |            | 0,432784162 |           | 0,35145131 |            | 0,301189756 |            | 0,302527864 |            | 0,286025319 |            |
|  | -0,1105                |            | -0,1215     |           | -0,16       |            | -0,1885     |           | -0,2285    |            | -0,283      |            | -0,2965     |            | -0,3435     |            |
| Průměrná<br>dvousměr-<br>ná<br>polohová<br>úchylna Xi<br>(mm)  |                        |            |             |           |             |            |             |           |            |            |             |            |             |            |             |            |
| Přesnost<br>nastavení<br>polohy v<br>ose A                     | 0,04403 - -0,493472136 |            |             |           |             |            |             |           |            |            |             |            |             |            |             |            |

Tab. 2 - Příklad záznamu měření přesnosti polohování v ose x[1]

- Jednosměrná opakovatelnost

$$R_i = 4 \cdot S_i \quad (5)$$

- Dvousměrná opakovatelnost

$$R_i = \max \cdot [2S_i \uparrow + 2S_i \downarrow + |B_i|; R_i \uparrow; R_i \downarrow] \quad (6)$$

- Necitlivost

$$B_i = x_i \uparrow - x_i \downarrow \quad (7)$$

- Přesnost nastavení polohy v ose

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (8)$$

Vypočtené hodnoty se vynesou do diagramu, ze kterého se určí následující hodnoty:

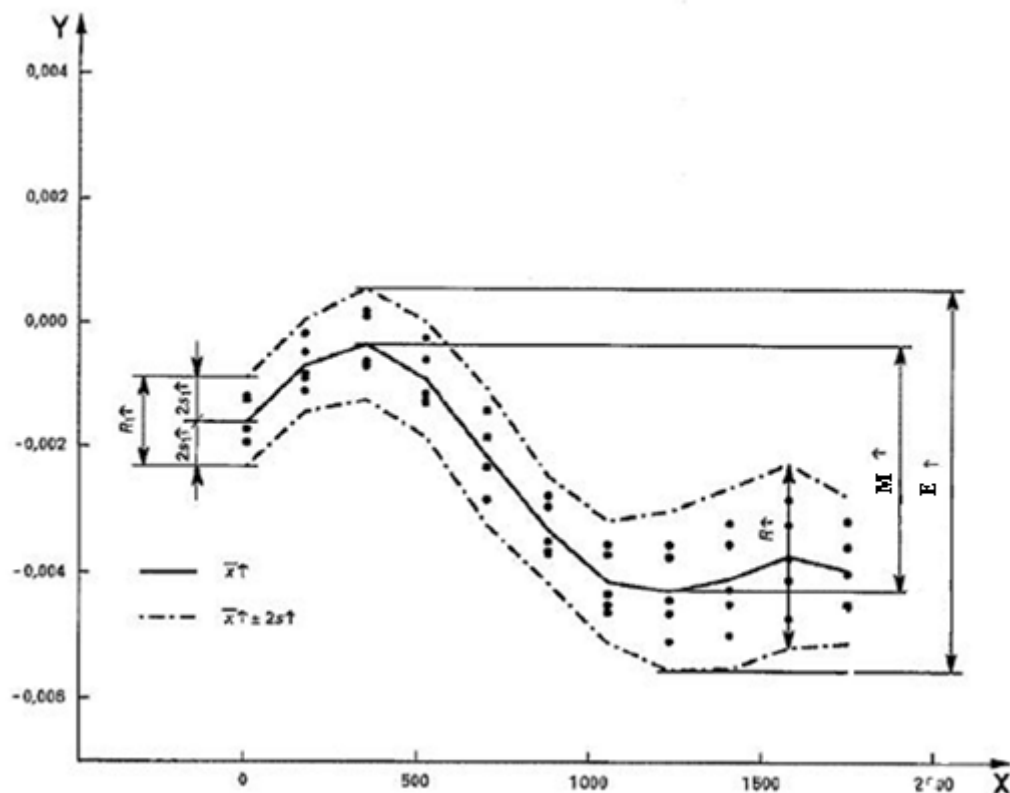
- Dvousměrná systematická polohová úchylka v ose E
- Maximální odchylka polohy  $M$  jako vzdálenost tečen rovnoběžných s nulovou přímkou odchylek diagramu

Dvousměrná systematická polohová úchylka v ose E:

- Jedná se o rozdíl mezi největší a nejmenší algebraickou hodnotou průměrných jednosměrných polohových úchylek při nastavování polohy v obou směrech, které byly zjištěny v kterékoliv poloze  $P_i$  podél nebo okolo dané osy.

Maximální odchylka polohy  $M$ :

- Jedná se o statisticky předpokládanou odchylku polohy, kterou může zaujmout pohybující se část stroje během pohybu v celé délce jedné souřadnicové osy při opakovaném najíždění do naprogramované polohy v jednom směru pohybu

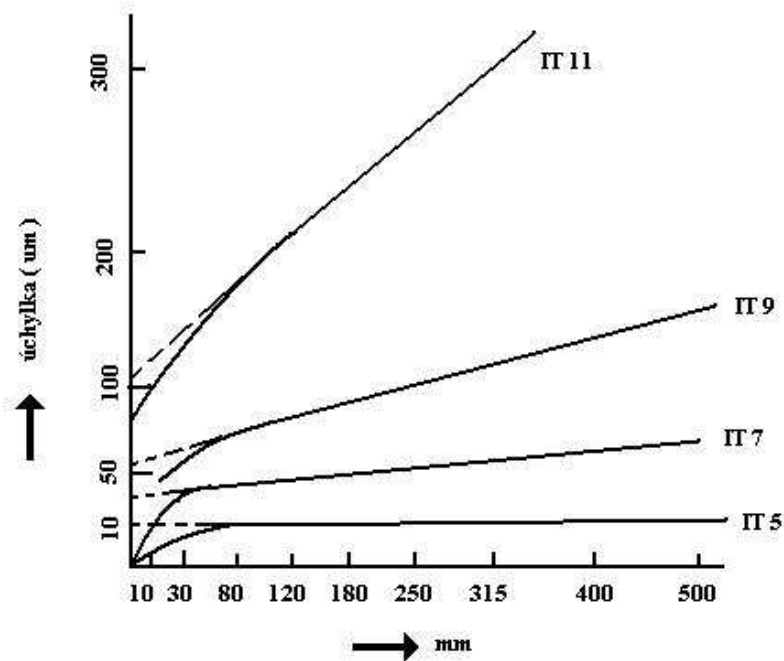


Obr. 16 Příklad vyhodnocení měření přesnosti polohování[1]

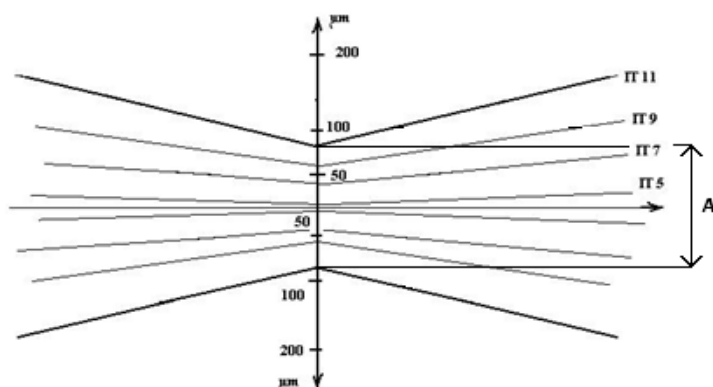
### 6.3 Přesnost stroje pomocí tříd IT

IT třídy nám udávají přípustné odchylky v závislosti na rozměrech. U CNC strojů se hovoří o odchylce v závislosti na délce dráhy pohybu v každé souřadnicové ose. Závislost odchylek na rozměru má lineární charakter pro velmi přesné třídy IT0 a IT1. Pro třídy vyšší se lineární charakter pomalu mění na nelineární, jak je patrné z obr. 17. Pro účely hodnocení CNC strojů se vytváří šablony, které mají tvar podle obr. 18, a kde hodnota A je maximální přípustná odchylka od nulového rozměru a ramena svírají úhel, podle kterého je definována příslušná IT třída.[1]





Obr. 17 Závislost odchylky na měřené délce podle tříd IT[1]

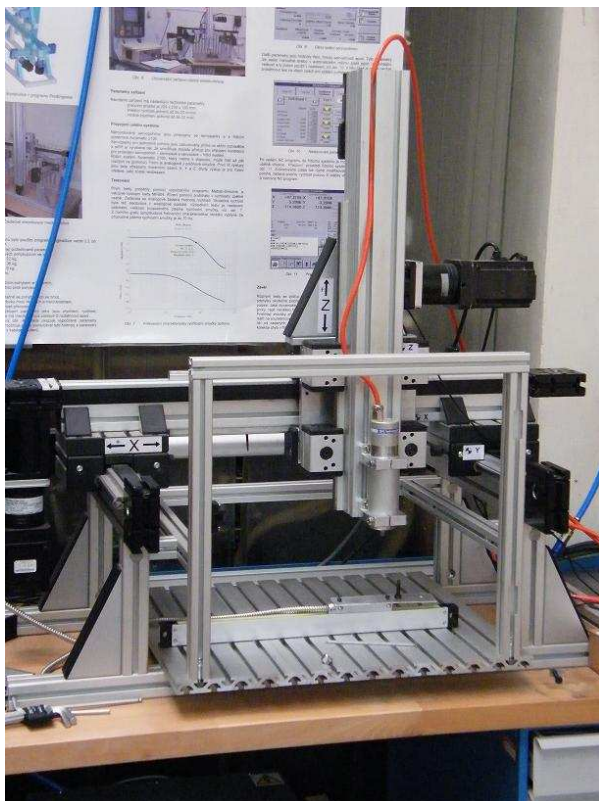


Obr. 18 Šablony IT pro měření přesnosti polohování[1]

Použití šablony zcela závisí na způsobu programování kontrolované souřadnice. U souřadnic s proměnným počátkem je šablona kladena na zjištěný průběh diagramu v různých polohách tak, že osy šablony zůstávají rovnoběžné s osami diagramu. Šablona, jejíž ramena nikdy neprotnou diagram odchylek, určuje IT třídu přesnosti stroje. U souřadnic s konstantním počátkem je použita pouze polovina šablony, kde se parametr A klade do počátku souřadnic a šablona je vyrovnána rovnoběžně s diagramem ve směru osy odchylek.[1]

## 7. Popis konstrukce prototypu obráběcího CNC stroje

Pro stavbu tohoto prototypu obráběcího CNC stroje byla zvolena portálová konstrukce sestavená z hliníkových profilů firmy ITEM. Velikost samotných profilů byla volena dle předpokládaného zatížení koncového prvku (v tomto případě vřetena) a to do maximálního zatížení 100 N. Další podmínkou volby byl požadavek pro dosažení zdvihu stroje 200x200x150 mm.[28]

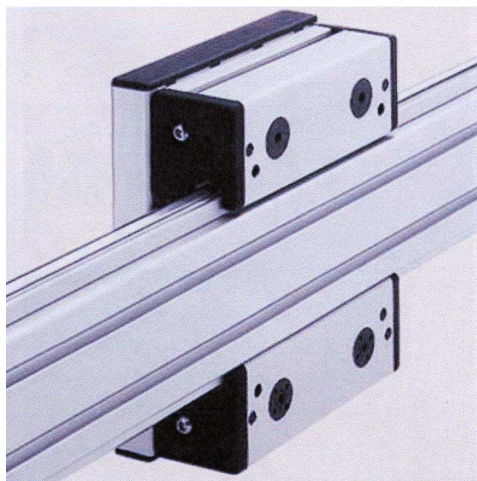


*Obr. 19 Prototyp CNC stroje*

Na základní rám stroje je osazena na deska Bed Plate, která zároveň plní funkci upínací desky. Rám je obdélníkového tvaru a jsou k němu připevněny čtyři podpěry, které slouží jako základ pro dva mosty, sestavené z hliníkových profilů. Mosty jsou uzpůsobeny jako kolejnice a slouží pro pojezd samotného portálu. V zadní části jsou mostové konstrukce spojeny náhonovou hřídelí, která slouží pro pohon v nich uložených ozubených řemenů.

Stroj se pohybuje ve třech osách. A to v osách X, Y a Z. K tomuto účelu jsou použity pohony realizované pomocí ozubených řemenů. Vedení těchto pohonů je kladičkové (obrázek 20), kde dva páry kladiček leží vždy proti sobě. Jednotlivé kladičky je možné utáhnout pomocí excentrických šroubů, čímž je možno

minimalizovat případné vůle vedení. Samotná konstrukce musí být dostatečně tuhá, aby se vlivem váhy vřetena a vlivem působení řezných sil nekroutila, zároveň však musí být lehká, aby nedocházelo k prohýbání vlivem tíhy vlastní konstrukce.



*Obr. 20 Ukázka kladičkového vedení*

Pohon řešený pomocí ozubených řemenů byl vybrán vzhledem k jeho nízké pořizovací ceně bez nutnosti instalace dalších podpůrných komponentů. Samotný ozubený řemen má několik výhod. Největší výhodou je vysoká hodnota maximálního zrychlení, které může dosahovat až  $40 \text{ m/s}^2$  a relativně velký rozsah zdvihu, který se může pohybovat v rozsahu  $0,3 \div 8 \text{ m}$ . Nejvyšší maximální rychlost, kterou mohou ozubené řemeny dosahovat je  $8 \text{ m/s}$ .

Stejně jako výhody, mají ozubené řemeny i nevýhody, které mohou někdy velice výrazně ovlivňovat výslednou přesnost polohování. Celková přesnost se pohybuje v rozsahu  $25 \div 50 \mu\text{m}$  a opakovaná přesnost najetí se pohybuje dokonce v rozsahu  $12 \div 300 \mu\text{m}$ . Tyto hodnoty závisí na typu použitého ozubeného řemenu a na jeho celkové tuhosti. U většiny typů ozubení se řemen opírá o vnější válcový povrch řemenice a odvaluje se po něm jako plochý řemen. Zuby mají v drážkách řemenice obvodovou i radiální vůli. Pouze zuby ozubení, označovaného AT, se radiálně opírají o dna drážek a na vnějším průměru mají vůli. Vůle jednoho zubu v drážce se liší u různých typů ozubení a u každého typu se mění v rámci tolerancí. Tolerance tvaru drážky jsou u moderních oblých zubů vyjádřeny pásmem o šířce  $\pm 0.05 \text{ mm}$ . Přesnost tvaru zubu řemenu je ovlivněna přesností formy, teplotou při výrobě a chlazením.

Příznivý vliv na přesnost řemenového převodu má současný záběr většího počtu zubů. Jmenovitá rozteč zubů řemenu se předepnutím řemenu zvětší a řemen se na

opásané délce prodlouží. Optimální vnější průměr řemenice je proto větší než teoretický. Je to zajišťováno předepsáním tolerančního pole s šířkou jedné až několika desetin mm do kladných hodnot. Přesto se rozteč zubů na řemenu liší od rozteče určené drážkami, takže první zub v záběru se opírá o opačný bok než poslední zub. Převod se chová jako převod bez vůle. Navíc se částečně vyloučí odchylky jednotlivých zubů. Přesnost převodu je ovlivněna házením obvodu obou řemenic. Přípustné házení je 0.1 mm, požadovat lze 0.05 mm. Přenos úhlu je dále ovlivněn tuhostí zubů a tažné vrstvy řemenu, která se zatížením pružně protahuje. [3]

Servopohon sloužící pro pohyb osy Y je při čelním pohledu umístěn na levé straně a je přes spojku spojen s náhonovou hřídelí. K horizontálnímu portálu je připojen opět z čelního pohledu na levé straně příslušný servopohon pro pohyb ve směru osy X. Na samotný portál je také připojena vertikální osa Z. Servopohon sloužící k jejímu pohybu je umístěn na pravé straně. Ke spodní části vertikálního profilu je upevněno vřeteno a to pomocí svěrného spojení.

Pro pohon osy X a Y jsou použity servomotory od firmy Yaskawa[27] s typovým označením SGMPH04AE41D. Pro pohon v ose Z je použit servomotor od stejné firmy avšak s typovým označením SGMPH04AAE4CD s na konci přidanou brzdou. Všechny tři servomotory mají integrovanou převodovku s poměrem převodu 1:10. Jejich výkon je 400 W s krouticím momentem 1,27 Nm, který se dá krátkodobě zvýšit na 3,82 Nm. Na konci vertikální osy Z je pomocí svěrného spojení připevněno elektrovřeteno od firmy IBAG s typovým označením HF 45.2 S 80 CP o výkonu 375 W, u kterého je možnost plynulé změny otáček v rozmezí 5 000 – 50 000  $\text{min}^{-1}$ .

Servopohony jsou ovládány pomocí řídicího systému Acramatic 2100 od firmy Siemens. Tento řídicí systém umožňuje řízení až v pěti osách, avšak u tohoto prototypu jsou obsazeny pouze čtyři řídicí výstupy. Tři výstupy slouží k ovládání polohových os X, Y a Z a čtvrtý výstup je připojen pro ovládání vřetena. Pátý výstup je prozatím volný pro případné připojení další funkce.

U námi testovaného prototypu CNC stroje je instalován nepřímý systém odměřování, který je integrován přímo do pohonu jednotlivých os. Nevýhodou tohoto systému odměřování je, že se ujetá vzdálenost počítá nepřímo z úhlu natočení, v našem případě se jedná o natočení řemenice, čímž vzniká nepřesnost polohování vlivem přepočítání natočení na ujetou vzdálenost. Tato chyba je cyklická a s narůstající měřenou vzdáleností se zvětšuje.

## **8. Zkoušky pro určení přesnosti polohování na prototypu CNC stroje**

V této kapitole budou popsána jednotlivá měření, která se provádějí u nových CNC strojů pro zjištění jejich celkové přesnosti polohování. Jedná se o systém zkoušek a měření, které nám poskytnou relativní a dostačující informace o přesnosti polohování daného CNC stroje. Po vyhodnocení celého souboru měření a provedení možných kompenzací je nutno celý soubor měření znovu opakovat a z naměřených výsledků vyhodnotit zda byla provedená kompenzace přínosná pro zlepšení přesnosti polohování či nikoliv.

### **8.1 Měření tuhosti konstrukce**

Na celkové tuhosti konstrukce obráběcího CNC stroje závisí také přesnost polohování. Při minimální tuhosti konstrukce bude docházet k velkým odchylkám měření vlivem působení průhybů konstrukce a tím k celkové pracovní nepřesnosti.

Měření se provádí pomocí zatížení koncového prvku konstrukce stroje (v drtivé většině případů je koncovým prvkem stroje vřeteno), které je měřeno silovým snímačem a následné posunutí koncového prvku je sledováno pomocí úchylkoměrů s velice jemným dělením. Samotné měření je nutno provádět v několika pozicích v osách kolmých na koncový prvek při kladném i záporném posuvu příslušných os. Měření je nutné několikrát opakovat vždy při vzrůstajícím zatížení koncového prvku. Na prototypu CNC stroje umístěného v laboratořích KVS byla měřena tuhost v rámci DP pana Kvaizara [10]

### **8.2 Měření na zjištění citlivosti os**

Pojem citlivost os lze definovat jako nejmenší velikost dráhy, při které dojde k posuvu koncového prvku o minimální možný krok. Koncový prvek zůstane v klidu po celou dobu zadávání kroku menšího, nežli je citlivost.

Samotné měření se provádí na každé souřadnicové ose zvlášť za pomocí přesného úchylkoměru, nebo přímého laseru promítaného na stupňovou tyč s přesností  $0,01 \mu m$ . Měření se provádí ve všech třech souřadnicových osách samostatně a v obou dvou směrech pohybu. Pro přesnější výsledky je vhodné měřit ve více pozicích na každé ose. Minimální počet měření je pět. Naměřenou citlivost os je poté nutno

porovnat s vypočtenou citlivostí os vzhledem k vlivům od převodovky a příslušného převodu.

### **8.3 Měření přímosti os**

Po měření citlivosti os je nutno také změřit přímost jednotlivých souřadnicových os. Toto měření se provádí z hlediska výskytu chyby přímosti jak v horizontální, tak ve vertikální rovině. Nejlepší je pro měření použít CCD kameru, která nám umožňuje sledování obou daných os pomocí jednoho nastavení. Další možností je použití dvoupaprskového laseru, který je použit v kombinaci s citlivým souřadnicovým polem, na kterém je vidět místo dopadu laserového paprsku. Přesnost měření v tomto případě závisí na přesnosti rastru snímáče a na přímosti laserového paprsku.[28]

### **8.4 Měření hystereze na osách**

Pod pojmem hystereze se rozumí součet všech vůlí, které se nachází v mechanismu. Jedná se především o vůle v převodovce, spojce, mezi zuby řemenice a řemene a také na tuhosti řemene. Samotné měření je prováděno pomocí úchylkoměru s velice jemným dělením. Koncový prvek nejprve najede do určitého bodu, kde je změřena hystereze, poté odjede nejprve v kladném směru o určitou velikost dráhy a vrátí se zpět do startovní pozice. V tuto chvíli se změří odchylka a koncový prvek odjede o stejnou vzdálenost v opačném směru. Opět se odečte odchylka a výsledná hystereze je rozdílem obou naměřených hodnot.[28]

### **8.5 Měření úhlové odchylky**

Každá pohybová osa je zatížena úhlovými chybami. Vždy se jedná o natočení okolo zbývajících dvou os souřadného systému a o natočení okolo vlastní osy. Odchylku natočení okolo vlastní osy nemusíme uvažovat pouze v případě osy Z u obráběcích CNC center, kde způsobuje natočení nástroje. Samotné měření úhlové odchylky je prováděno pomocí dvoupaprskového laseru doplněného o úhlovou optiku, nebo také pomocí dvojice přesných vodovah. Stejně jako v případě měření přímosti os

měření citlivosti os je potřeba měření provádět v několika bodech pro co nejpřesnější zjištění jednotlivých úhlových odchylek.

## **8.6 Měření součtové chyby**

Pomocí měření součtové chyby se zjišťuje odchylka skutečné polohy koncového prvku od polohy naprogramované pro každou souřadnicovou osu. Měření je nutno provádět na jednotlivých osách v obou dvou směrech. Jak v kladném tak i v záporném směru. Celá dráha jednotlivých os je rozdělena na několik stejných úseků, které oddělují jednotlivá místa měření. Do každé polohy je opakovaně najížděno konstantní rychlostí jak v kladném, tak i v záporném směru. Takto naměřené hodnoty odchylek skutečné hodnoty od naprogramované jsou zaneseny do grafu pro lepší orientaci. Ze všech takto naměřených hodnot je následně vytvořen kompenzační soubor, který nám následně pomáhá při kompenzaci součtové chyby a k dosažení vyšší přesnosti polohování na CNC stroji.[16]

## **8.7 Kompenzace polohových chyb**

Po vyhodnocení všech naměřených chyb a jejich přesné identifikaci je možno celkovou přesnost polohování zvýšit dvěma způsoby.

- Softwarová kompenzace – jedná se o úpravu hlavně součtové chyby pomocí řídicího programu samotného CNC stroje.
- Mechanická kompenzace – provedení jednoduchých konstrukčních úprav nebo jednoduché seřízení pohonů, které mají vliv na celkovou součtovou chybu. Při úpravách konstrukce je důležité zaměřit se na zvýšení tuhosti samotné konstrukce, ale za cenu co nejmenšího zvýšení hmotnosti. Je také možno vyměnit jednotlivá vedení pohonu za přesnější.

Po každé kompenzaci polohových chyb je nutno provést jednotlivá měření znovu pro vyhodnocení výsledku, zda měly jednotlivé úpravy žádaný efekt, nebo nikoliv.

## 9. Měření přesnosti polohování na prototypu CNC stroje

V této části práce se zaměříme na samotné měření na námi testovaném prototypu CNC stroje, který je umístěn v laboratořích KVS při TUL. Při měření přesnosti polohování se zaměříme hlavně na měření součtové chyby, měření hystereze na osách a na kompenzaci polohových chyb.

### 9.1 Metodika měření součtové chyby

Stroj musí být nastaven, tak, aby se vřeteno pohybovalo podél měřené osy do řady zadaných bodů, ve kterých vždy zůstane v klidu dostatečně dlouho, aby mohla být dosažená skutečná poloha dosažena, změřena a zaznamenána. Stroj musí být naprogramován tak, aby se pohyb mezi zadanými polohami vykonával dohodnutou rychlostí, nejvíce však 20% maximální rychlosti stroje.

Volba každé zadané polohy je zcela individuální a počítá se dle všeobecného vzorce [16]

$$P_i = (i - 1)p + r \quad (11)$$

kde

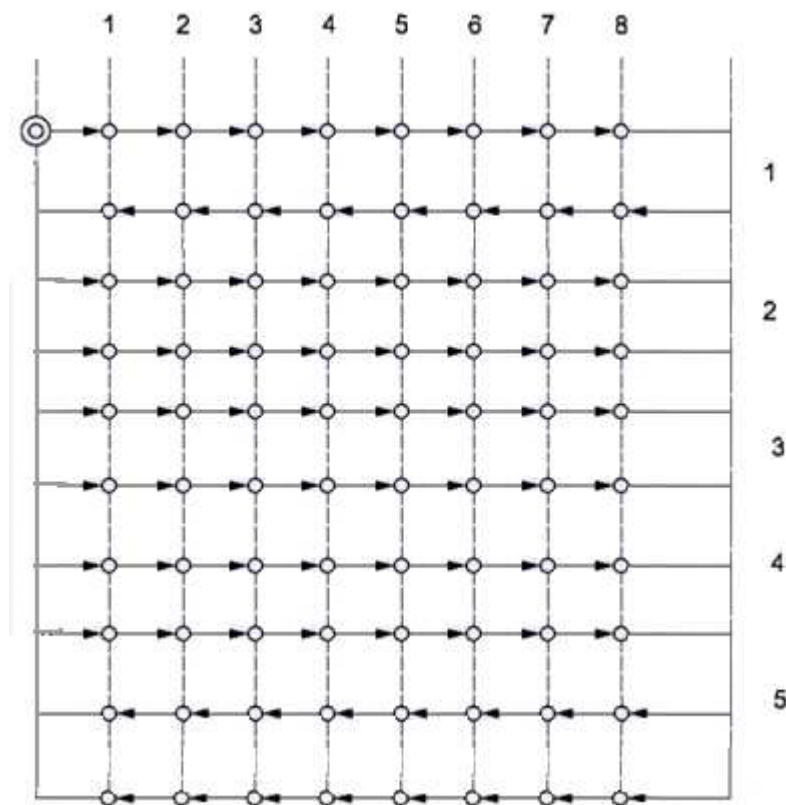
- $i$  - je číslo uvažované zadané polohy
- $p$  - jmenovitý interval, zajišťující rovnoměrné rozložení zadaných hodnot v měřeném rozsahu
- $r$  – náhodné číslo v  $\pm$  amplitudě možné periodické chyby (jako jsou například chyby způsobené stoupáním kuličkového šroubu nebo roztečí rysek lineárních kruhových měřítok) což umožňuje, aby periodické chyby byly dostatečným způsobem indikovány a kde. Jestliže žádná informace o možné periodické chybě není dostupná, pak  $r$  bude v rozmezí  $\pm 30\%$  hodnoty  $p$

Samotné uspořádání měřících přístrojů, musí být navrženo tak, aby byla změřena změna relativní polohy mezi částí nesoucí nástroj a částí nesoucí obrobek ve směru pohybu v měřené ose.

V osách stroje s rozsahem dráhy do 2 000 mm musí být zvoleno minimálně pět poloh na metr a minimálně pět poloh celkově. Měření musí být provedeno ve všech



zadaných polohách při použití běžného zkušebního cyklu (viz obrázek 22). Do každé zadané polohy musí být v obou směrech najeto pětkrát. Poloha pro změnu směru pohybu by měla být zvolena tak, aby bylo možné normální chování stroje.



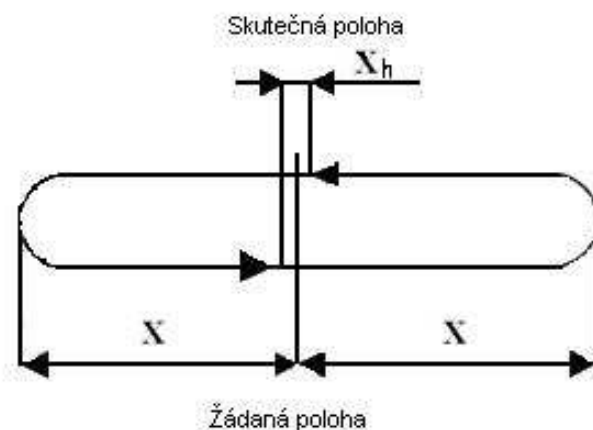
*Obr. 21 Zkušební cyklus[16]*

Pro každou zadanou polohu  $P_i$  a pro pět nastavení polohy ( $n=5$ ) v každém směru se vyhodnotí příslušné parametry dle kapitoly 6.2 a vše se zaznamená do přehledné tabulky.

## 9.2 Metodika měření hystereze na osách

Základní metodika pro měření hystereze na osách je pro nastavení stroje, měřících přístrojů a volby počtu polohy totožná s popisem metodiky měření součtové chyby, která byla uvedena v kapitole 7.1, z tohoto důvodu nepovažuji za nutné zde metodiku základního nastavení stroje a volbu poloh zнову uvádět.

Při měření hystereze na osách, musí být opět pro osu stroje s rozsahem dráhy do 2 000 mm zvoleno minimálně pět poloh na metr a minimálně pět poloh celkově. Stroj najede do zadané polohy pro měření hystereze a poodjede se nejprve v kladném směru o danou vzdálenost, která by neměla přesáhnout 100% zadané polohy rychlostí nejvíce 20% maximální rychlosti stroje, kde zůstane v klidu dostatečně dlouho, aby mohla být dosažená skutečná poloha dosažena, změřena a zaznamenána. Následně se stroj vrátí do zadané polohy. Rozdíl mezi zadanou polohou a skutečně dosaženou polohou je měřená hystereze v kladném směru najíždění stroje. Totéž opakujeme i v záporném směru najíždění stroje. Do každé zadané polohy musí být v obou směrech najeto pětkrát, pro vyloučení náhodných vlivů.[16]



Obr. 22 Zkušební cyklus pro měření hystereze[27]

Rozdíl takto naměřených hodnot se v závislosti na stále větší vzdálenosti měřeného bodu bude lišit, ale naměřené hodnoty se poté zprůměrují a výsledná hodnota nám určí celkovou hysterezi stroje v dané ose.

## 10. Měření polohové přesnosti prototypu CNC stroje a kompenzace polohových chyb

V této části diplomové práce bude popsán průběh samotnému měření na prototypu CNC stroje, který je umístěn v laboratořích KVS na TU v Liberci. Měření probíhalo ve dvou fázích, kde během prvního měření byla změřena součtová chyba a hystereze stroje bez jakýchkoliv softwarových kompenzací. Po vyhodnocení všech výsledků byl zpracován kompenzační soubor a po zadání kompenzačních dat bylo měření zopakováno.

Součtová chyba a hystereze byly měřeny pouze pro pracovní osu X, která má pracovní rozsah 0 – 220 mm. Na začátku samotného měření byly spočítány hodnoty poloh, ve kterých byla součtová chyba a hystereze na ose měřeny. Výpočet byl proveden podle normy ČSN ISO 230-2. Samotný vzorec je popsán v kapitole 9.1, vzorec 11. Vypočtené hodnoty jsou vidět v tabulce č.4.

| i  | 1    | 2    | 3  | 4    | 5   | 6     | 7   | 8     |
|----|------|------|----|------|-----|-------|-----|-------|
| Pi | 8,25 | 21,5 | 53 | 89,5 | 106 | 143,5 | 168 | 184,5 |

Tab. 4 – Vypočtené hodnoty bodů měření

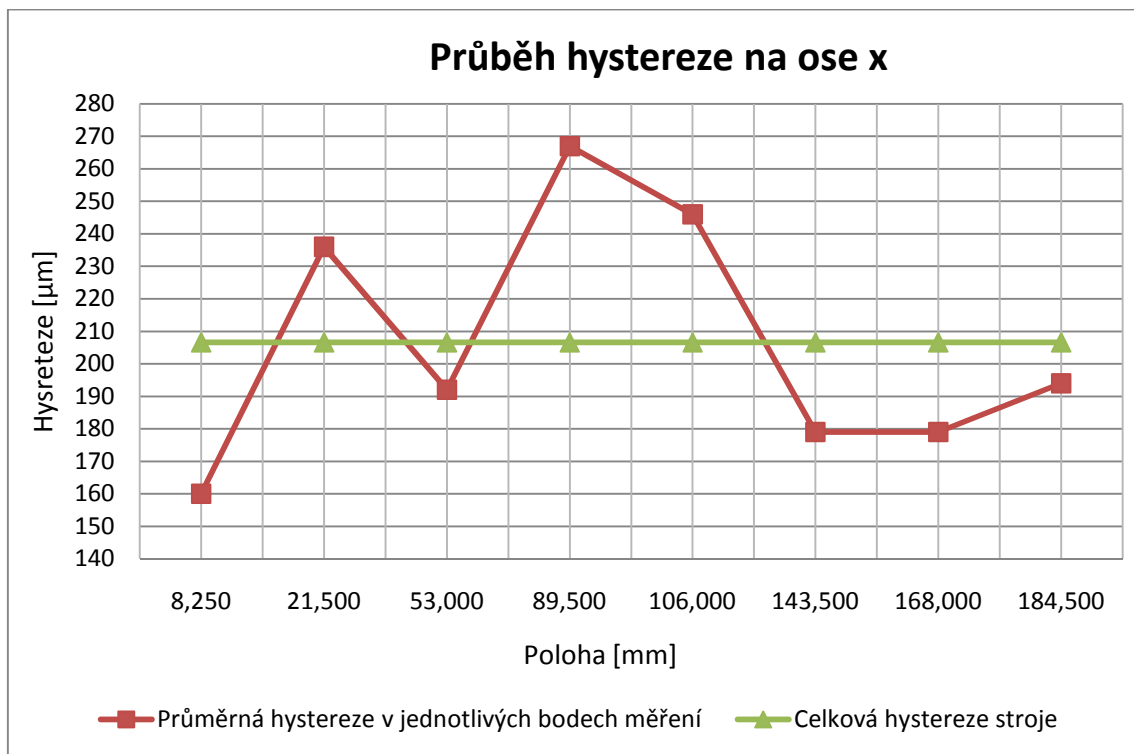
### 10.1 Praktické měření hystereze na osách

Hystereze je součet všech vůlí v celém mechanismu stroje. Jedná se o vůle v převodovce, spojce, vůle řemene, také vůle v tuhosti řemene. Všechny tyto vlivy se projeví v polohové odchylce koncového prvku.

K samotnému měření bylo použito lineární pravítko od firmy Mitutoyo AT115-300 s dělením po 0,005 mm. Rychlost najíždění byla stanovena dle ČSN ISO 230-2 na 20 % maximální rychlosti stroje, což v našem případě činilo rychlost 1500 mm/min. Polohy os Y a Z byly  $Y = 106,03$  mm a  $Z = 37,68$  mm. Měření probíhalo ve všech stanovených bodech tímto způsobem. Nejprve koncový prvek najel do určeného bodu v kladném směru. Po najetí jsme vynulovali měřicí zařízení a spustili předem připravený cyklus stroje. Koncový prvek nejprve odjel v záporném směru najíždění o vzdálenost 8 mm a ihned se vrátil do zadané polohy. Na záznamovém zařízení jsme odečetli hodnotu a tu jsme zaznamenali do přehledné tabulky a následně do grafů (příloha II, str. 1,2). Následně koncový prvek odjel o 8 mm v kladném směru a opět se okamžitě vrátil do výchozího bodu. Opět jsme ze záznamového zařízení odečetli

rozdílnou hodnotu v daném bodě. Celý cyklus se v každém měřeném bodě opakoval celkem 5 krát. Celková hystereze v měřené ose byla vypočtena zprůměrováním všech naměřených hodnot.

Jak jsme předpokládali, tak hystereze není podél celé osy konstantní, ale je proměnlivá. Ukázka na obr. 23.



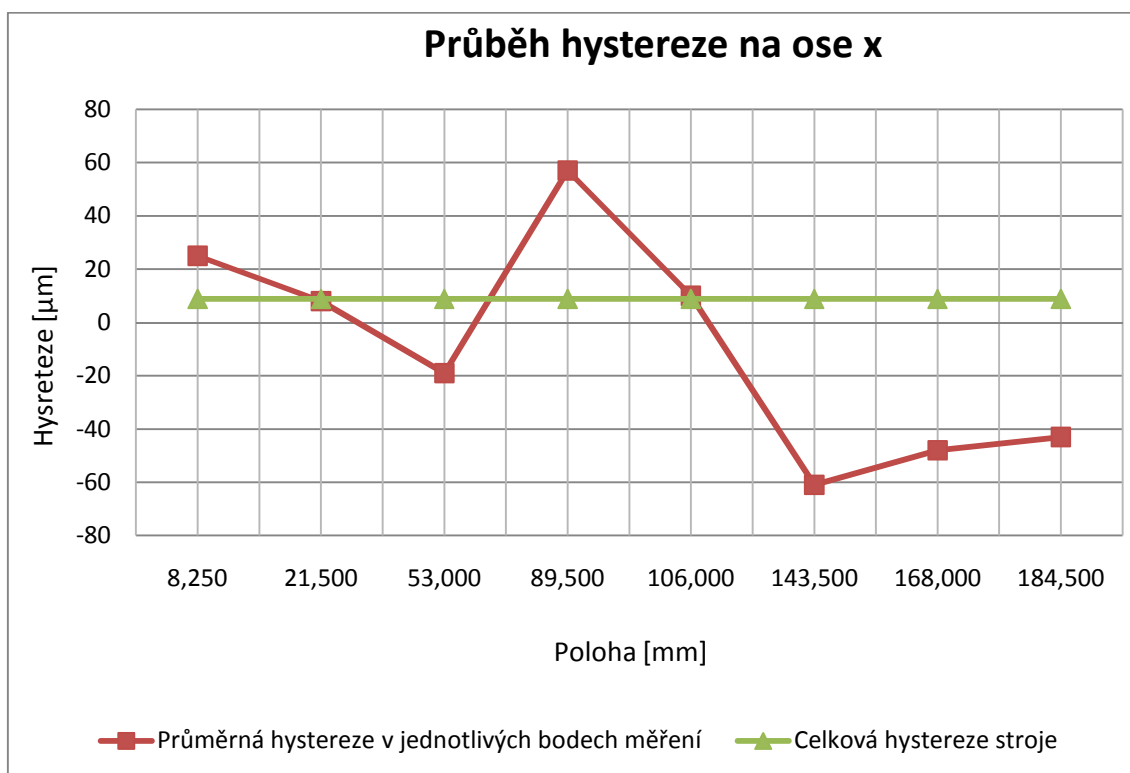
*Obr. 23 Průběh hystereze s průměrnou hodnotou na ose X*

Na svislé ose grafu jsou vyneseny hodnoty hystereze, která byla v jednotlivých bodech naměřena, a na vodorovné ose jsou vyneseny jednotlivé měřené body. Červená křivka nám udává průběh hystereze přes všechny body a zelená křivka nám udává celkovou průměrnou hysterezi na ose X. Rozdílná hystereze v jednotlivých polohách může být dána různým předepnutím řemenů, nesouosým uložením řemenic nebo vlivem konstrukční nepřesnosti rámu stroje.

Z naměřených a vypočtených hodnot je vidět, že hystereze se v jednotlivých bodech pohybuje v rozmezí 160 – 267  $\mu\text{m}$  a celková průměrná hystereze je 206,625  $\mu\text{m}$ .

## 10.2 Kompenzace hystereze

Samotná hystereze se dá odstranit přímo v řídicím systému stroje a to nastavením kompenzačního parametru Backlash. Poté co jsme do parametru Backlash zadali námi dříve vypočtenou hodnotu hystereze 206,625  $\mu\text{m}$ , jsme znovu provedli všechna měření hystereze na ose X. Všechny naměřené hodnoty jsme opět zaznamenali do přehledné tabulky a do grafů (příloha I, str. 3,4). Ukázka grafu hystereze po zadání parametru Backlash je na obr. 24.

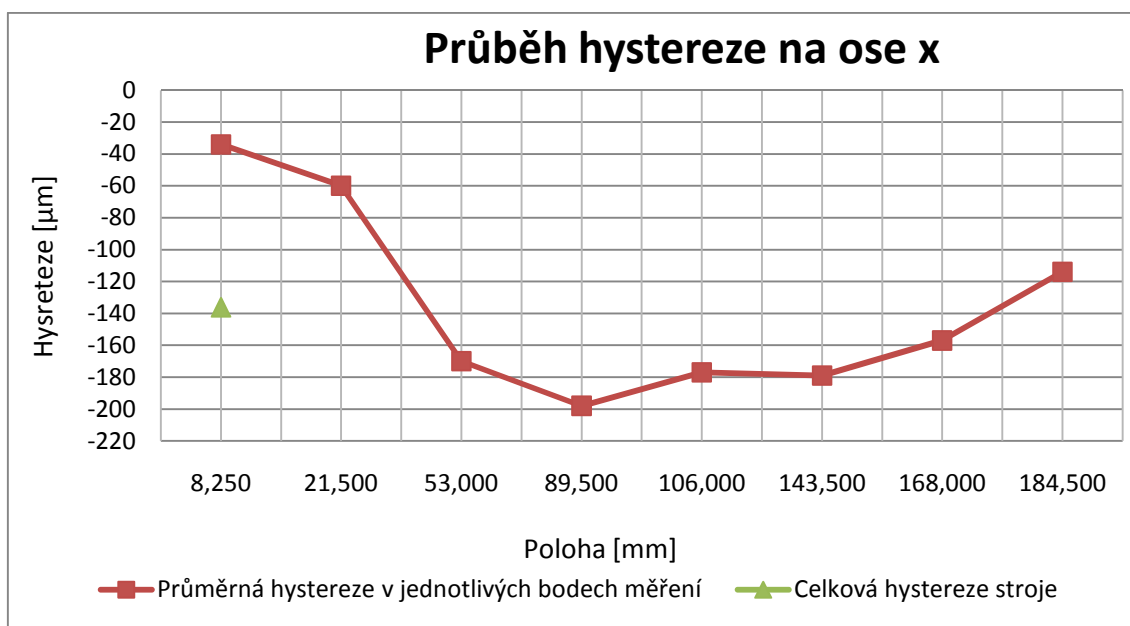


*Obr. 24 Průběh hystereze s průměrnou hodnotou na ose X po zadání parametru Backlash*

Jak je z grafu patrné, tak po kompenzaci se hystereze pohybuje v intervalu -61 – 57  $\mu\text{m}$  a celková průměrná hystereze je 8,875  $\mu\text{m}$ . Je zřejmé, že se hystereze výrazně zlepšila, ale nikdy nebude nulová v celé délce měřené osy právě z důvodů nestejného předepnutí řemenů, popřípadě nesouososti řemenic atp.

### 10.3 Měření hystereze po zadání kompenzačních dat pro součtovou chybu, bez kompenzace hystereze

Po zadání kompenzačního souboru pro součtovou chybu bylo znovu provedeno měření hystereze, při kterém však byl parametr Backlash vypnut. Všechna naměřená data byla opět zapsána do přehledné tabulky a vynesena do grafů pro možnost dalších výpočtů (příloha I, str. 5,6). Ukázka grafu hystereze po zadání kompenzačního souboru pro součtovou chybu je na obr. 25.



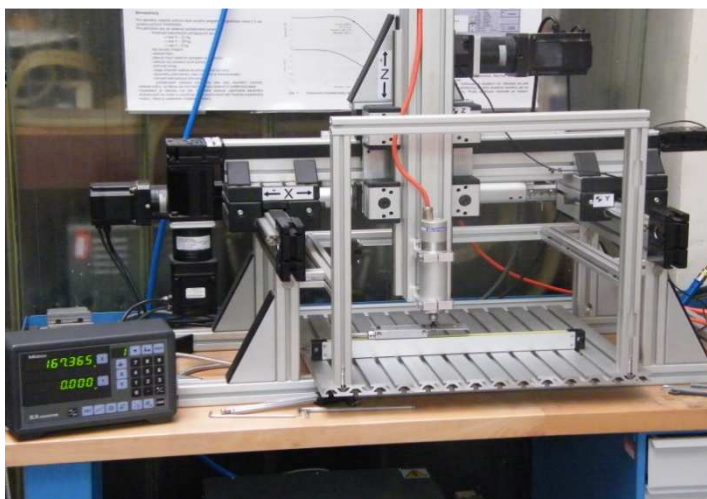
Obr. 25 Průběh hystereze po zadání kompenzačního souboru součtové chyby

Jak je z grafu patrné, tak průběh hystereze na měřené ose X se výrazně změnil oproti předchozím měřením. Může to být dáno tím, že velikost kompenzačních dat pro součtovou chybu je v každém bodě jinak velký a proto je jiný i průběh hystereze. Při zadání kompenzace hystereze je zadaná hodnota v celé ose stejná. Jak je dále z grafu vidět, tak naměřená hystereze se pohybuje v rozmezí – 35 až – 190  $\mu\text{m}$  a celková průměrná hystereze je – 136,125  $\mu\text{m}$ . Je patrné, že došlo k částečnému zlepšení hystereze, avšak také je patrné, že tímto způsobem hysterezi kompenzovat nelze, z důvodu rozdílných kompenzačních hodnot v jednotlivých bodech měření.

## 10.4 Praktické měření součtové chyby

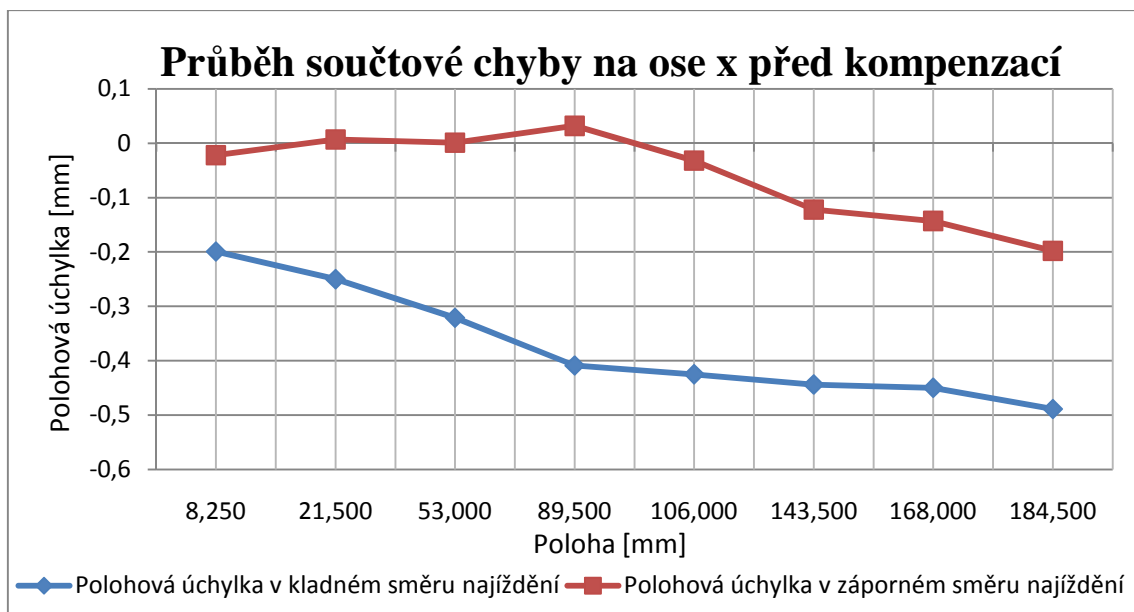
Pomocí měření součtové chyby se zjišťuje odchylka skutečné polohy koncového prvku (v našem případě je koncovým prvkem vřeteno) od hodnoty, která je požadována. Najížděcí rychlost byla v souladu s normou ČSN ISO 230-2 stanovena na 13,3 % maximální rychlosti stroje. V našem případě to znamená rychlost 1000 mm/min. Pro samotné měření bylo použito lineární pravítko od firmy Mitutoyo AT115-300 s dělením po 0,005 mm viz obr. 26.

Během měření byly hodnoty os Y = 106,03 mm a Z = 37,68 mm. Podle zadaného řídicího programu stroj vždy najížděl do jednotlivých zadaných hodnot, kde vyčkal přesně daný čas, aby mohla být dosažená skutečná poloha dosažena, změřena a zaznamenána.



*Obr. 26 Měření součtové chyby na ose X pomocí lineárního pravítka*

Po projetí celé dráhy, se stroj vrátil do nulové polohy s tím, že vždy v každé měřené poloze se opět zastavil, aby mohla být dosažená skutečná poloha dosažena, změřena a zaznamenána. Tudíž při jednom cyklu stroje byla měřena polohová odchylka jak z kladného směru najíždění (od 0 mm do 220 mm), tak i v záporném směru najíždění (od 220 mm do 0 mm). Celý cyklus se opakoval celkem 5 krát. Všechny hodnoty polohových úchylek byly zaznamenány do přehledné tabulky (příloha II, str. 1), kde byly dále použity pro výpočet celkové polohové přesnosti stroje. Průměrné hodnoty polohových chyb v kladném a záporném směru najíždění byly vyneseny pro větší přehlednost do grafu (příloha II, str. 2), ukázka na obr. 2Ý.

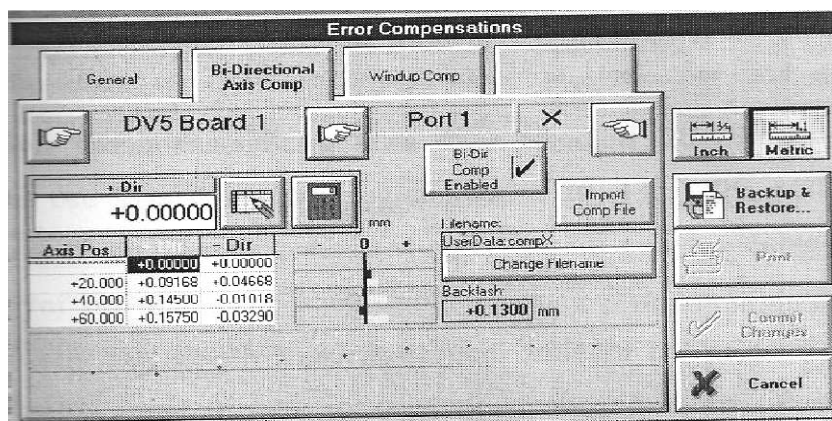


*Obr. 27 Průběh součtové chyby na ose X před kompenzací*

Na svislé ose grafu je vynesena polohová odchylka od žádané polohy, která je vynesena na vodorovné ose grafu. Modrá křivka v grafu nám udává průměrné hodnoty naměřené v kladném směru najíždění a červená křivka nám udává průměrné hodnoty naměřené v záporném směru najíždění. Podle průměru těchto dvou křivek byl následně vytvořen kompenzační soubor. Celková přesnost polohování osy X před zadáním kompenzačních dat byla spočtena dle ČSN ISO 230-2 na hodnotu 44 až -493  $\mu\text{m}$ , což lze zařadit do kategorie přesnosti IT 12.

## 10.5 Kompenzace součtové chyby

Kompenzace součtové chyby se nastavuje přímo v řídicím programu stroje v oddíle konfigurace systému, kde se zvolí chybová kompenzace a tam se zvolí Bi-Directional and Friction viz obr. 28.



*Obr. 28 Nastavení kompenzací*



Na obrázku jsou vidět tři sloupce pro zadávání dat. Axis Pos, kde je možné volit interval, v jakém mají být kompenzační data zadávána. +DIR, tento sloupec nám dovolu je zadat kompenzační odchylku od žádané polohy při najíždění z kladného směru do zadané polohy. – DIR, tento sloupec nám dovolu je zadat kompenzační odchylku od žádané polohy při najíždění ze záporného směru do zadané polohy. Interval v položce Axis Pos lze měnit, ale vždy je poté nutno přepsat i kompenzační data. Při zadání kompenzačních hodnot do sloupců +DIR a – DIR se nám také vykreslí pod těmito sloupečky průběh součtové chyby ve formě bodů podél vodorovné osy.

Z dat naměřených před kompenzací byla vypracována tabulka s kompenzačními daty, která byla poté zadána do příslušných sloupečků. Kompenzační data jsou vidět v tabulce č. 5.

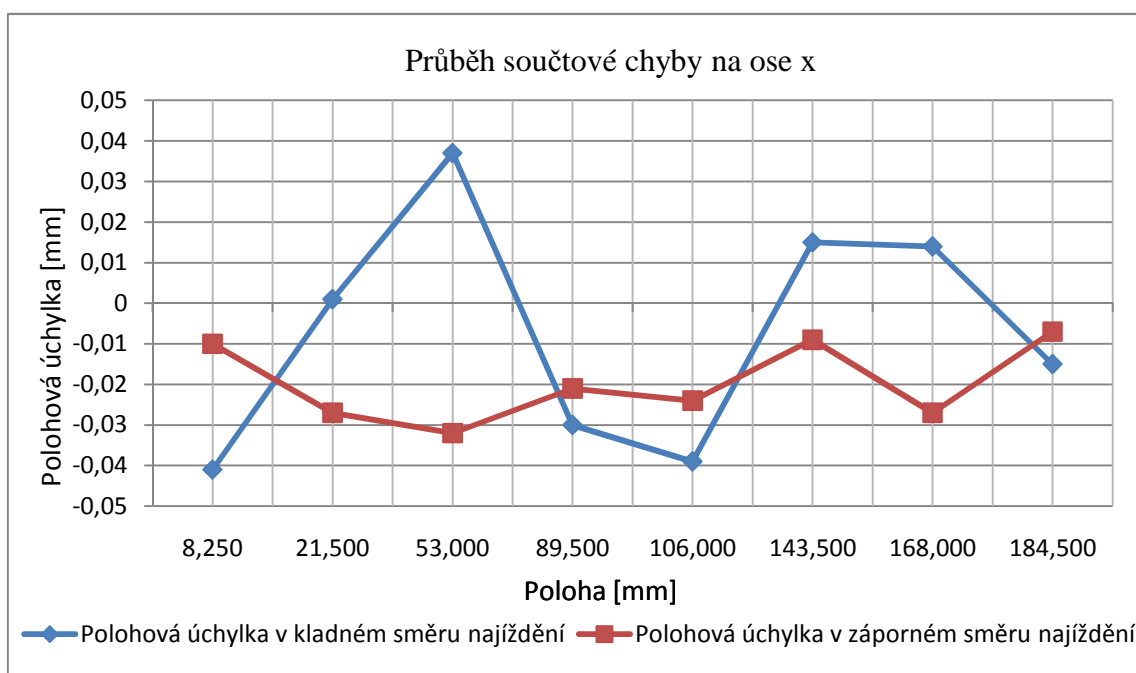
| Kompenzační data v kladném směru |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Pozice [mm]                      | 0    | 10   | 20   | 30   | 40   | 50   | 60   | 70   | 80   | 90   |
| Hodnota kompenzace [μm]          | 0    | -200 | -250 | -280 | -300 | -320 | -350 | -380 | -400 | -409 |
| Pozice [mm]                      | 100  | 110  | 120  | 130  | 140  | 150  | 160  | 170  | 180  | 190  |
| Hodnota kompenzace [μm]          | -417 | -425 | -435 | -440 | -444 | -450 | -450 | -470 | -490 | -500 |

| Kompenzační data v záporném směru |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|
| Pozice [mm]                       | 0   | 10  | 20  | 30  | 40   | 50   | 60   | 70   | 80   | 90   |
| Hodnota kompenzace [μm]           | 0   | -22 | 7   | 5   | 3    | 1    | 10   | 19   | 26   | 32   |
| Pozice [mm]                       | 100 | 110 | 120 | 130 | 140  | 150  | 160  | 170  | 180  | 190  |
| Hodnota kompenzace [μm]           | 0   | -32 | -60 | -90 | -122 | -130 | -139 | -143 | -200 | -220 |

*Tab. 5 – Kompenzační hodnoty v kladném a záporném směru najíždění*

## 10.6 Přesnost polohování po kompenzaci součtové chyby

Po zadání všech kompenzací součtové chyby v řídicím systému stroje, byla provedena nová měření součtové chyby. Postup měření byl stejný jako v kapitole 10.3. Naměřené hodnoty byly opět zapsány do přehledných tabulek, kde s nimi bylo dále počítáno (příloha II, str. 3). Z naměřených a spočítaných hodnot byly opět sestaveny příslušné grafy (příloha II, str. 4) viz ukázka obr. č. 29.

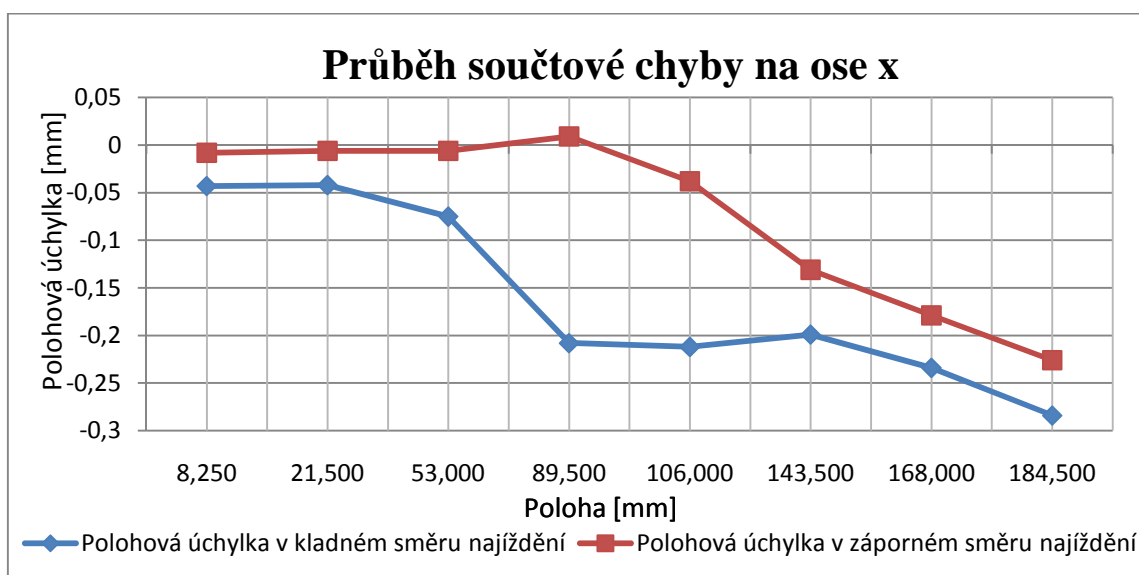


Obr. 29 Průběh součtové chyby na ose X po kompenzaci

Z grafu je patrné, že součtová chyba v ose X při kladném směru najíždění je v rozmezí  $\pm 40 \mu\text{m}$  a v záporném směru najíždění je v rozmezí  $-32$  až  $-7 \mu\text{m}$ . Přičemž celková přesnost nastavení v ose X je  $42$  až  $-73 \mu\text{m}$ . Výslednou přesnost námi testovaného prototypu CNC stroje je možno zařadit do kategorie IT 5 – IT 6.

## 10.7 Přesnost polohování po kompenzaci hystereze, bez kompenzace součtové chyby

Po zadání kompenzačního parametru Backlash, avšak bez zadání kompenzačního souboru pro součtovou chybu bylo znovu provedeno měření součtové chyby. Všechna naměřená data byla opět zapsána do přehledné tabulky a vynesena do grafů pro možnost dalších výpočtů (příloha II, str. 5,6). Ukázka grafu součtové chyby po zadání kompenzačního parametru Backlash je na obr. 30.



Obr. 30 Průběh součtové chyby po zadání parametru Backlash

Na svislé ose grafu je vynesena polohová odchylka od žádané polohy, která je vynesena na vodorovné ose grafu. Modrá křivka v grafu nám udává průměrné hodnoty naměřené v kladném směru najíždění a červená křivka nám udává průměrné hodnoty naměřené v záporném směru najíždění. Oproti měření součtové chyby před zadáním kompenzačního souboru se výsledné křivky k sobě výrazně přiblížily. Po výpočtu všech potřebných údajů, můžeme konstatovat, že celková přesnost polohování osy X po kompenzaci hystereze, ale před zadáním kompenzačních dat pro součtovou chybu byla spočtena dle ČSN ISO 230-2 na hodnotu 13 až -297  $\mu\text{m}$ , což lze zařadit do kategorie přesnosti IT 8 – IT 9. Je patrné, že pomocí kompenzace hystereze lze součtovou chybu částečně eliminovat, avšak ne v takovém rozsahu jako přímým zadáním kompenzačního souboru součtové chyby.

## 11. Závěr

V rámci této diplomové práce byla sestavena metodika měření přesnosti polohování prototypu CNC stroje, který byl sestaven na katedře KVS Technické univerzity v Liberci a zároveň byla provedena praktická měření pro zjištění skutečné polohové přesnosti tohoto stroje.

Diplomová práce je rozdělena do tří hlavních částí. V první části je proveden rozbor problematiky polohové přesnosti obráběcích CNC strojů spolu s popisem možných polohových chyb a souvisejících částí stroje, bez kterých by bylo samotné měření a vyhodnocování přesnosti polohování velice obtížné, ne-li přímo nemyslitelné.

Ve druhé části práce je sestavena metodika samotného měření polohové přesnosti prototypu obráběcího CNC stroje, spolu s popisem jednotlivých zkoušek, které se na prototypu obráběcích CNC strojů provádějí a ze kterých se následně vyhodnocuje přesnost obrábění stroje a jeho zařazení do příslušné třídy přesnosti.

Ve třetí části práce je popsán průběh praktického měření přesnosti polohování stroje. Měření byla prováděna nejprve bez jakýchkoliv kompenzací v řídicím softwaru, a následně po zadání kompenzačních dat byla měření opakována a znovu vyhodnocena polohová přesnost CNC stroje. Během praktického měření byly ze všech zkoušek, které se mohou měřit provedena pouze měření hystereze a měření součtové chyby, oboje na ose X. Po vyhodnocení prvního měření byla zjištěna polohová přesnost stroje 44 až -493  $\mu\text{m}$ , což můžeme zařadit do třídy přesnosti IT 12 a celková průměrná hystereze na ose X byla naměřena o velikosti 206,625  $\mu\text{m}$ . Po zadání kompenzačních dat do řídicího softwaru byla obě měření provedena znovu a po vyhodnocení naměřených údajů, můžeme říct, že kompenzace vedla ke zvýšení polohové přesnosti stroje. Celková průměrná hystereze na ose X po kompenzaci je 8,875  $\mu\text{m}$  a přesnost polohování se zlepšila na 42 až -73  $\mu\text{m}$ , což můžeme zařadit do třídy přesnosti IT 5 – IT 6. Tato přesnost polohování by měla být pro následné využití prototypu CNC stroje dostačující.

Také bylo provedeno měření součtové chyby po zadání pouze kompenzace hystereze a měření hystereze pouze po zadání kompenzačního souboru pro součtovou chybu. U obou měření došlo k částečnému zlepšení přesnosti polohování prototypu CNC stroje, avšak ne v dostatečném rozsahu. Proto je lepší zadávat jak kompenzační soubor pro součtovou chybu, tak kompenzaci hystereze pomocí parametru Backlash.

Pro větší třídu přesnosti polohování by bylo nutné provést konstrukční úpravy, například vyměnit řemenový převod za kuličkový šroub, nebo pastorek a hřeben. Jistě by stálo za úvahu i zvýšení tuhosti samotného vedení stroje. Tyto zásahy do samotné konstrukce CNC stroje by mohly být předmětem jiné práce.

## **Použitá literatura**

- [1] BRENÍK, P; PÍČ, J.: Obráběcí stroje, konstrukce a výpočty. SNTL Praha 1986
- [2] BRYCHTA, J.: Výrobní stroje obráběcí. VŠB-Technická univerzita Ostrava. Ostrava 2003, ISBN 80-248-0237-6
- [3] HOSTR s.r.o., Liberec, ČR, 08/05/2011,  
<http://www.hostr.cz/sysadmin/data/cs/products/5/files/ozure1.pdf>
- [4] HOUŠA, J.: Konstrukce číslicově řízených obráběcích strojů. SNTL Praha, 1985
- [5] JENÍK. J.:Konstrukce osy C soustruhu, Bakalářská práce, VUT Brno 2010
- [6] KELLER, P.:Programování a řízení CNC strojů. TUL 2005
- [7] KOCANDA, P.:Deskripce lineárních posuvových soustav obráběcích strojů, Bakalářská práce, VUT Brno 2008
- [8] KÖNIG, V.: Obráběcí stroje, skripta, VŠST Liberec 1989, ISBN 80-7083-023-9
- [9] KRATOCHVÍL, J.: Obráběcí stroje. ČVUT 1993
- [10] KVAIZAR, M.: Tuhost konstrukce prototypu CNC stroje, Diplomová práce, TUL 2011
- [11] MÁČALÍK,T.: Analýza chování servopohonů u systému CNC firmy Siemens, Diplomová práce, UTB Zlín 2010
- [12] MACHÁČEK, P.: Nové možnosti měření na souřadnicových strojích. ČVUT 2008
- [13] MAYTEC Aluminium Systemtechnik GmbH, Německo, 01/05/2011,  
[http://www.maytec.de/mainframe\\_e.htm](http://www.maytec.de/mainframe_e.htm)
- [14] Misan s.r.o., Lysá nad Labem, ČR, 30/03/2011,  
<http://www.misan.cz/misan/obsah-kategorie/misan/sluzby/>
- [15] MITUTOYO, Japonsko, 07/05/2011,  
<http://www.mitutoyo-czech.cz/cz/katalog.htm>

- [16] Norma ČSN ISO 230-2, UNMZ 2010
- [17] Průmyslové spektrum, ČR, 15/02/2011,  
<http://www.mmspektrum.com/clanek/kvalita-chodu-vreten-obrabecich-stroju>
- [18] Renishaw apply innovation, USA, 04/03/2011,  
<http://www.renishaw.com/en/position-encoders--6331>
- [19] Sahos s.r.o., Pištín, ČR, 12/05/2011, <http://www.sahos.cz/cs/produkty/>
- [20] Sborník přednášek: Chyby a nejistoty měření. Brno 1999
- [21] Sborník přednášek: Výrobní stroje, automatizace a robotizace ve strojírenství. Praha 2000
- [22] Sborník přednášek: Výrobní stroje, automatizace a robotizace ve strojírenství. Praha 2004
- [23] Technik, ČR, 13/04/2011,  
[http://technik.ihned.cz/c4-10004030-12627740-800000\\_d-chyby-stroju-je-treba-kvantifikovat](http://technik.ihned.cz/c4-10004030-12627740-800000_d-chyby-stroju-je-treba-kvantifikovat)
- [24] UZIMEX s.r.o., Praha, ČR, 21/03/2011,  
[http://www.uzimex.cz/download.php?file=/soubory/20061114\\_tt\\_2006-23-lupa.pdf](http://www.uzimex.cz/download.php?file=/soubory/20061114_tt_2006-23-lupa.pdf)
- [25] VÁVRA. Z.: Programové moduly pro obrábění v prostředí programu SurfCAM, Bakalářská práce, UTB Zlín 2010
- [26] Výzkumné centrum při ČVUT, Praha, ČR, 01/03/2011,  
<http://www.rcmt.cvut.cz/presentations.html?id=11>
- [27] YASKAWA, Japonsko, 28/04/2011, <http://www.yaskawa.com>
- [28] ZELENÝ, P.: Návrh a konstrukce prototypu víceúčelového CNC stroje, Disertační práce, TUL 2006

## **Seznam příloh**

**Příloha I:** Výsledky měření hystereze prototypu CNC stroje

**Příloha II:** Výsledky měření součtové chyby prototypu CNC stroje

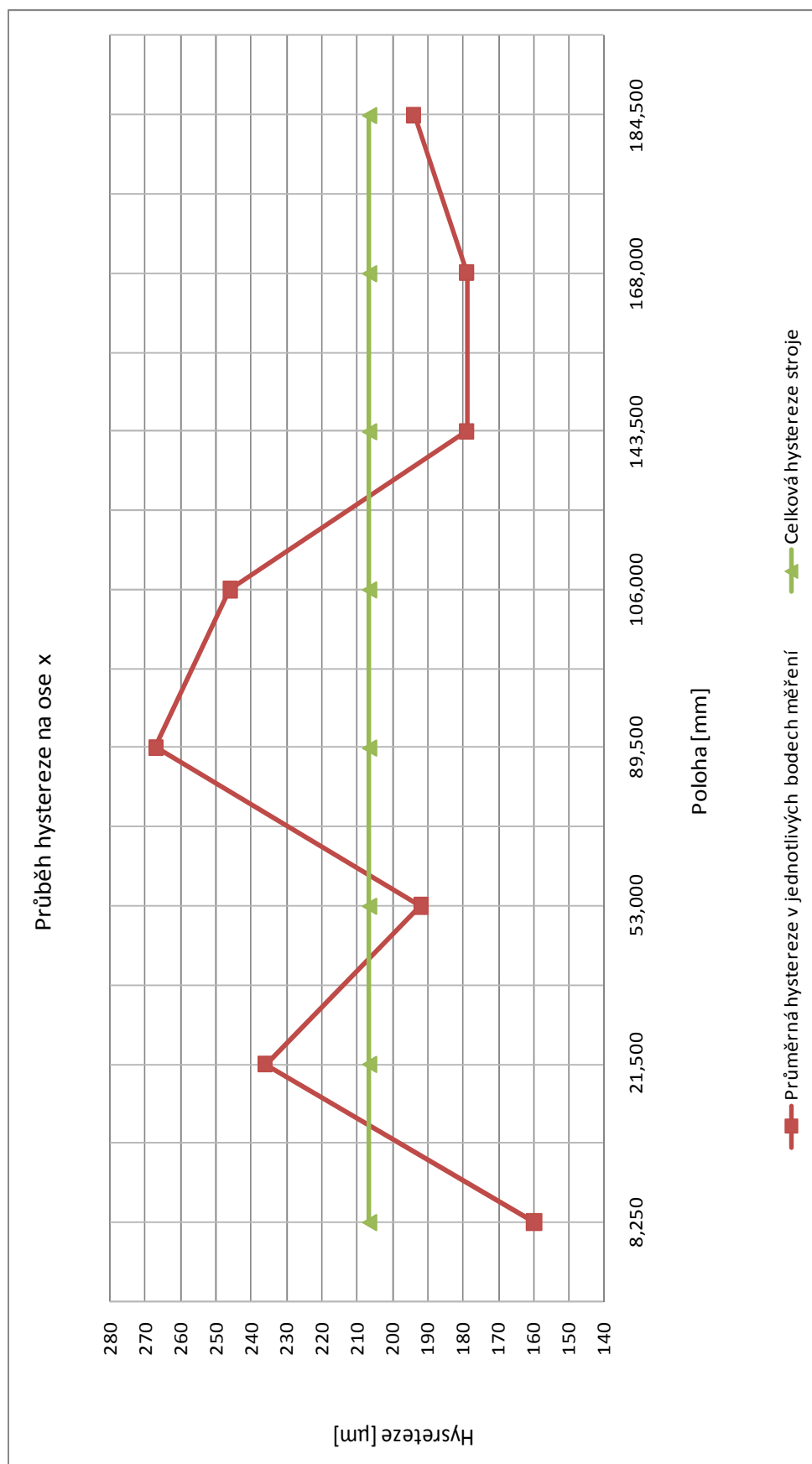


# Příloha I

Naměřené hodnoty hystereze před kompenzací hystereze

| Zadaná poloha $P_i$ (mm)  | 8,250   |     | 21,500 |     | 53,000 |     | 89,500 |     | 106,000 |     | 143,500 |     | 168,000 |     | 184,500 |     |
|---|---------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|
|   | ↓       | ↑   | ↓      | ↑   | ↓      | ↑   | ↓      | ↑   | ↓       | ↑   | ↓       | ↑   | ↓       | ↑   | ↓       | ↑   |
| Smysl najeť   | 0       | 160 | 15     | 255 | 10     | 195 | 15     | 280 | 15      | 250 | 50      | 225 | 15      | 190 | 45      | 250 |
|   | 0       | 165 | 5      | 260 | 10     | 200 | 5      | 275 | -15     | 250 | 55      | 230 | -10     | 190 | 60      | 255 |
|   | 5       | 165 | 20     | 250 | 10     | 205 | -10    | 275 | -5      | 250 | 50      | 230 | 20      | 190 | 70      | 255 |
|   | 5       | 165 | 15     | 255 | 10     | 205 | 20     | 275 | 25      | 250 | 55      | 235 | 20      | 195 | 65      | 260 |
|   | 5       | 160 | 30     | 245 | 10     | 205 | 20     | 280 | 0       | 250 | 50      | 235 | 20      | 195 | 70      | 260 |
| Průměrná jednosměrná polohová hystereze $X_i$ ( $\mu\text{m}$ )       | 3       | 163 | 17     | 253 | 10     | 202 | 10     | 277 | 4       | 250 | 52      | 231 | 13      | 192 | 62      | 256 |
| Celková průměrná hystereze v kladném směru najždění ( $\mu\text{m}$ ) | 160     |     | 236    |     | 192    |     | 267    |     | 246     |     | 179     |     | 179     |     | 194     |     |
| Celková průměrná hystereze ( $\mu\text{m}$ )                          | 206,625 |     |        |     |        |     |        |     |         |     |         |     |         |     |         |     |

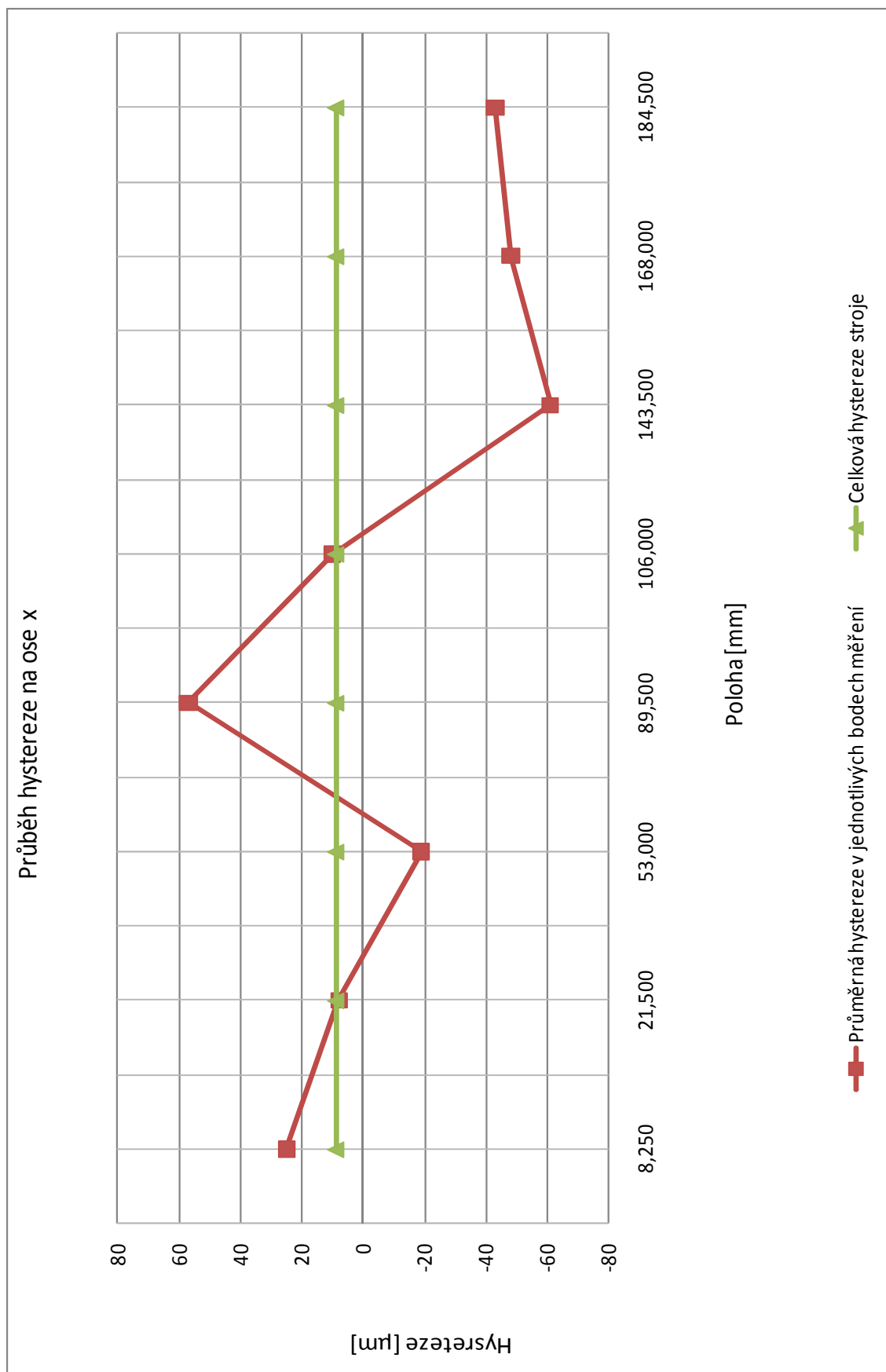
Graf hystereze před kompenzací hystereze



Naměřené hodnoty hystereze po kompenzaci hystereze

| Zadaná poloha Pi (mm)                                     | 8,250 |   | 21,500 |    | 53,000 |     | 89,500 |    | 106,000 |    | 143,500 |     | 168,000 |     | 184,500 |    |
|---|-------|---|--------|----|--------|-----|--------|----|---------|----|---------|-----|---------|-----|---------|----|
| Smysl najetí  | ↓     | ↑ | ↓      | ↑  | ↓      | ↑   | ↓      | ↑  | ↓       | ↑  | ↓       | ↑   | ↓       | ↑   | ↓       | ↑  |
| Polohové hystereze (μm)                                   | -20   | 0 | 15     | 30 | -75    | -90 | 5      | 65 | 30      | 40 | 40      | -10 | 20      | -20 | 40      | 10 |
|   | -25   | 0 | 20     | 30 | -75    | -95 | 25     | 70 | 35      | 45 | 60      | -10 | 35      | -20 | 70      | 25 |
|   | -25   | 0 | 25     | 35 | -75    | -95 | 30     | 70 | 40      | 45 | 55      | -5  | 30      | -20 | 75      | 25 |
|   | -25   | 0 | 30     | 35 | -75    | -95 | 0      | 70 | 35      | 45 | 55      | -10 | 30      | -20 | 75      | 30 |
|   | -30   | 0 | 35     | 35 | -75    | -95 | 0      | 70 | 30      | 45 | 50      | -10 | 30      | -15 | 75      | 30 |
| Průměrná jednosměrná polohová hystereze Xi (μm)           | -25   | 0 | 25     | 33 | -75    | -94 | 12     | 69 | 34      | 44 | 52      | -9  | 29      | -19 | 67      | 24 |
| Celková průměrná hystereze v kladném směru na řždění (μm) | 25    |   | 8      |    | -19    |     | 57     |    | 10      |    | -61     |     | -48     |     | -43     |    |
| Celková průměrná hystereze (μm)                           | 8,875 |   |        |    |        |     |        |    |         |    |         |     |         |     |         |    |

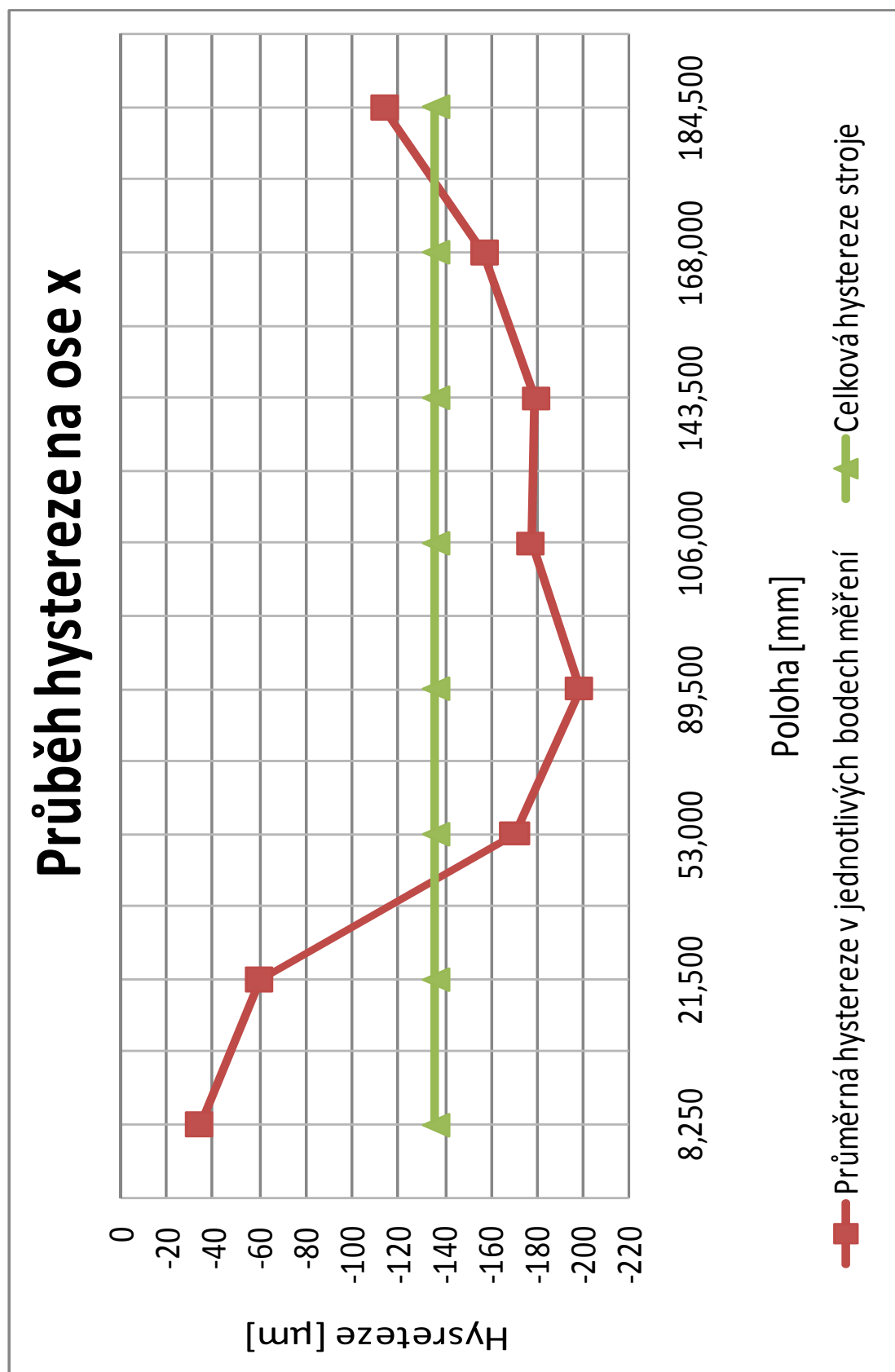
Graf hystereze po kompenzaci hystereze



Naměřené hodnoty hystereze po zadání kompenzačních dat pro součtovou chybu, bez kompenzace hystereze

| Zadaná poloha Pi (mm)                                     | 8,250    |     | 21,500 |     | 53,000 |      | 89,500 |      | 106,000 |     | 143,500 |      | 168,000 |      | 184,500 |     |
|---|----------|-----|--------|-----|--------|------|--------|------|---------|-----|---------|------|---------|------|---------|-----|
| Smysl najetí  | ↓        | ↑   | ↓      | ↑   | ↓      | ↑    | ↓      | ↑    | ↓       | ↑   | ↓       | ↑    | ↓       | ↑    | ↓       | ↑   |
| Polohové hystereze (μm)                                   | 10       | -20 | 45     | -10 | 20     | -150 | -5     | -200 | 130     | -45 | 20      | -155 | 40      | -120 | 35      | -70 |
|   | 15       | -20 | 45     | -20 | 25     | -150 | 5      | -195 | 135     | -40 | 30      | -150 | 45      | -110 | 55      | -60 |
|   | 15       | -20 | 45     | -25 | 25     | -150 | 5      | -190 | 135     | -40 | 30      | -150 | 50      | -110 | 60      | -60 |
|   | 15       | -20 | 30     | -25 | 35     | -145 | 5      | -190 | 140     | -40 | 30      | -150 | 45      | -110 | 55      | -60 |
|   | 15       | -20 | 30     | -25 | 0      | -150 | 10     | -195 | 140     | -40 | 35      | -145 | 45      | -110 | 55      | -60 |
| Průměrná hodnota polohová hystereze Xi (μm)               | 14       | -20 | 39     | -21 | 21     | -149 | 4      | -194 | 136     | -41 | 29      | -150 | 45      | -112 | 52      | -62 |
| Celková průměrná hystereze v kladném směru najíždění (μm) | -34      |     | -60    |     | -170   |      | -198   |      | -177    |     | -179    |      | -157    |      | -114    |     |
| Celková průměrná hystereze (μm)                           | -136,125 |     |        |     |        |      |        |      |         |     |         |      |         |      |         |     |

Graf hystereze po zadání kompenzačních dat pro součtovou chybu, bez kompenzace hystereze

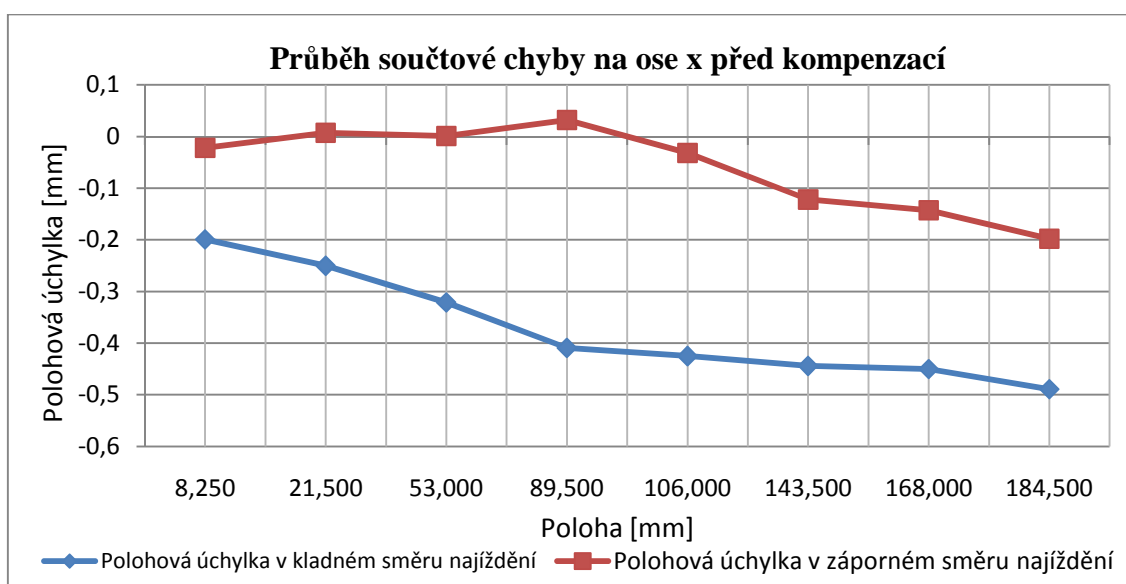
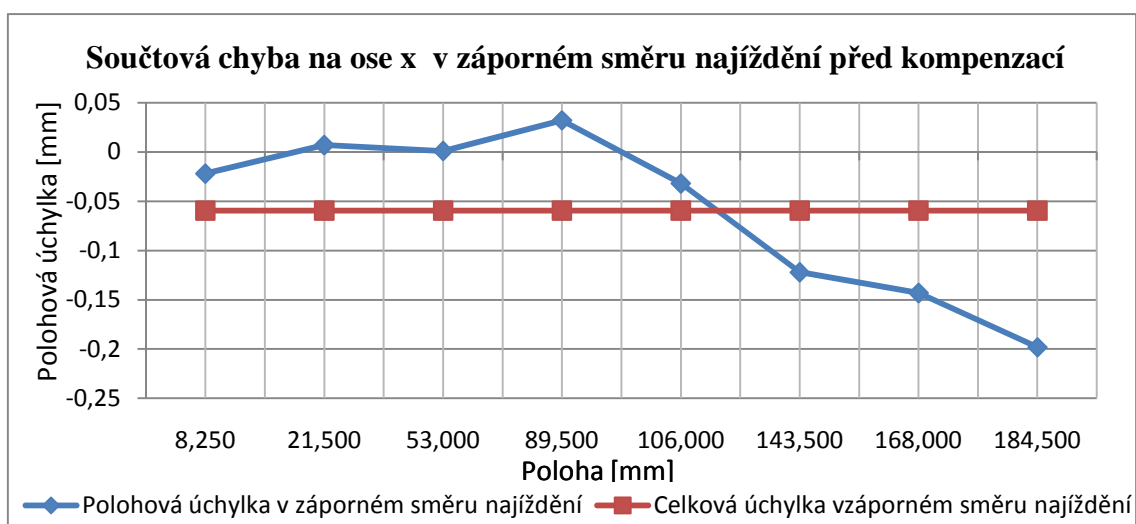
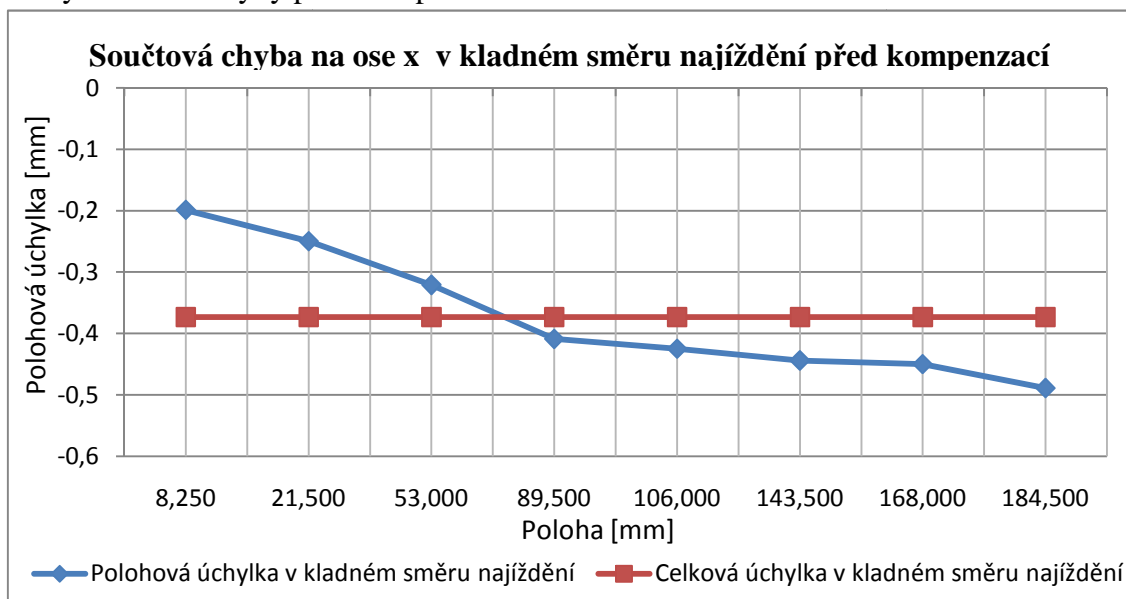


## Příloha II

Naměřené a vypočtené hodnoty součtové chyby před kompenzací

| Zadaná poloha Pí (mm)                         | 8,250       |             | 21,500       |             | 53,000      |              | 89,500      |             | 106,000      |            | 143,500     |              | 168,000     |             | 184,500      |             |
|---|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|
|   | ↓           | ↑           | ↓            | ↑           | ↓           | ↑            | ↓           | ↑           | ↓            | ↑          | ↓           | ↑            | ↓           | ↑           | ↓            | ↑           |
| Smysl nálezí<br><br>Polohové úchytky (mm)     | -0,195      | -0,025      | -0,25        | 0,01        | -0,32       | 0            | -0,41       | 0,03        | -0,425       | -0,015     | -0,445      | -0,115       | -0,45       | -0,15       | -0,49        | -0,2        |
|   | -0,195      | -0,025      | -0,245       | 0,01        | -0,32       | 0,005        | -0,4        | 0,03        | -0,42        | -0,1       | -0,445      | -0,115       | -0,45       | -0,145      | -0,49        | -0,195      |
|   | -0,2        | -0,025      | -0,25        | 0,005       | -0,32       | 0            | -0,41       | 0,03        | -0,425       | -0,015     | -0,445      | -0,115       | -0,45       | -0,14       | -0,49        | -0,195      |
|   | -0,195      | -0,015      | -0,25        | 0,005       | -0,325      | 0            | -0,41       | 0,035       | -0,43        | -0,015     | -0,44       | -0,155       | -0,45       | -0,14       | -0,49        | -0,2        |
| Průměrná jednosměrná polohová úchytky Xi (mm) | -0,21       | -0,02       | -0,255       | 0,005       | -0,32       | 0            | -0,415      | 0,035       | -0,425       | -0,015     | -0,445      | -0,11        | -0,45       | -0,14       | -0,485       | -0,2        |
|   | -0,199      | -0,022      | -0,25        | 0,007       | -0,321      | 0,001        | -0,409      | 0,032       | -0,425       | -0,032     | -0,444      | -0,122       | -0,45       | -0,143      | -0,489       | -0,198      |
| Odhad běžné nejistoty Si (mm)                 | 6,52E-03    | 4,47E-03    | 3,54E-03     | 2,74E-03    | 2,24E-03    | 2,24E-03     | 5,48E-03    | 2,74E-03    | 3,54E-03     | 3,80E-02   | 2,24E-03    | 1,86E-02     | 0,00E+00    | 4,47E-03    | 2,24E-03     | 2,74E-03    |
|   | 1,30E-02    | 8,94E-03    | 7,07E-03     | 5,48E-03    | 4,47E-03    | 4,47E-03     | 1,10E-02    | 5,48E-03    | 7,07E-03     | 7,60E-02   | 4,47E-03    | 3,71E-02     | 0,00E+00    | 8,94E-03    | 4,47E-03     | 5,48E-03    |
| Xi - 2Si (mm)                                 | -0,2120384  | -0,0309443  | -0,2570711   | 0,0015228   | -0,3254721  | -0,0034721   | -0,4199545  | 0,0265228   | -0,4320711   | -0,1080263 | -0,4484721  | -0,1591484   | -0,45       | -0,1519443  | -0,4934721   | -0,2034772  |
|   | -1,86E-01   | -1,31E-02   | -2,43E-01    | 1,25E-02    | -3,17E-01   | 5,47E-03     | -3,98E-01   | 3,75E-02    | -4,18E-01    | 4,40E-02   | -4,40E-01   | -8,49E-02    | -4,50E-01   | -1,34E-01   | -4,85E-01    | -1,93E-01   |
| Jednosměrná opakovanost Ri=4Si (mm)           | 2,61E-02    | 1,79E-02    | 1,41E-02     | 1,10E-02    | 8,94E-03    | 8,94E-03     | 2,19E-02    | 1,10E-02    | 1,41E-02     | 1,52E-01   | 8,94E-03    | 7,43E-02     | 0,00E+00    | 1,79E-02    | 8,94E-03     | 1,10E-02    |
|   | -0,177      | -0,177      | -0,257       | -0,257      | -0,322      | -0,322       | -0,441      | -0,441      | -0,393       | -0,393     | -0,322      | -0,322       | -0,307      | -0,307      | -0,291       | -0,291      |
| Dvousměrná opakovanost Ri (mm)                | 0,166008662 | 0,250725853 | 0,317527864  | 0,432784162 | 0,517527864 | 0,517527864  | 0,432784162 | 0,432784162 | 0,35145131   | 0,35145131 | 0,301189756 | 0,301189756  | 0,302527864 | 0,302527864 | 0,286025319  | 0,286025319 |
|   | -0,1105     | -0,1215     | -0,16        | -0,1885     | -0,2285     | -0,2285      | -0,1885     | -0,1885     | -0,2285      | -0,2285    | -0,283      | -0,283       | -0,2965     | -0,2965     | -0,3435      | -0,3435     |
| Průměrná dvousměrná polohová úchytky Xi (mm)  | -0,1105     | -0,1215     | -0,16        | -0,1885     | -0,2285     | -0,2285      | -0,1885     | -0,1885     | -0,2285      | -0,2285    | -0,283      | -0,283       | -0,2965     | -0,2965     | -0,3435      | -0,3435     |
|   | -0,1105     | -0,1215     | -0,16        | -0,1885     | -0,2285     | -0,2285      | -0,1885     | -0,1885     | -0,2285      | -0,2285    | -0,283      | -0,283       | -0,2965     | -0,2965     | -0,3435      | -0,3435     |
| Přesnost nastavení polohy v ose A             | 0,04403     | -           | -0,493472136 | 0,04403     | -           | -0,493472136 | 0,04403     | -           | -0,493472136 | 0,04403    | -           | -0,493472136 | 0,04403     | -           | -0,493472136 | 0,04403     |
|   | 0,04403     | -           | -0,493472136 | 0,04403     | -           | -0,493472136 | 0,04403     | -           | -0,493472136 | 0,04403    | -           | -0,493472136 | 0,04403     | -           | -0,493472136 | 0,04403     |

## Grafy součtové chyby před kompenzací

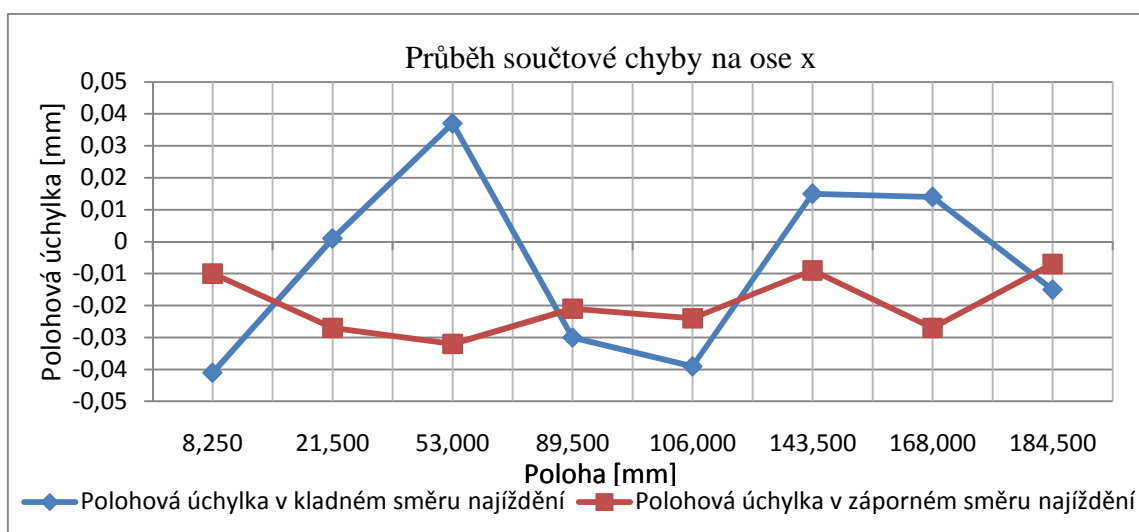
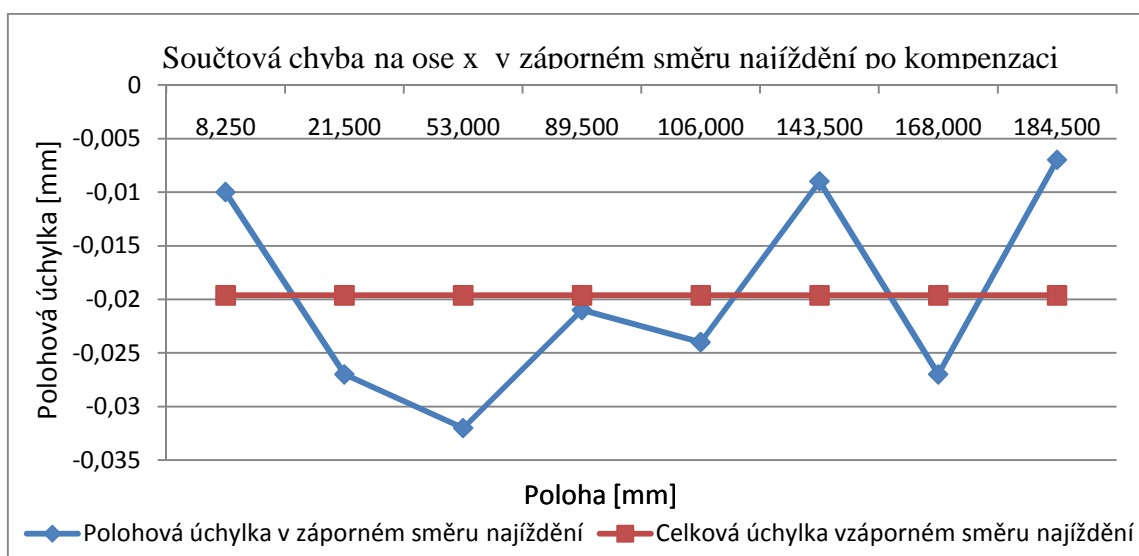
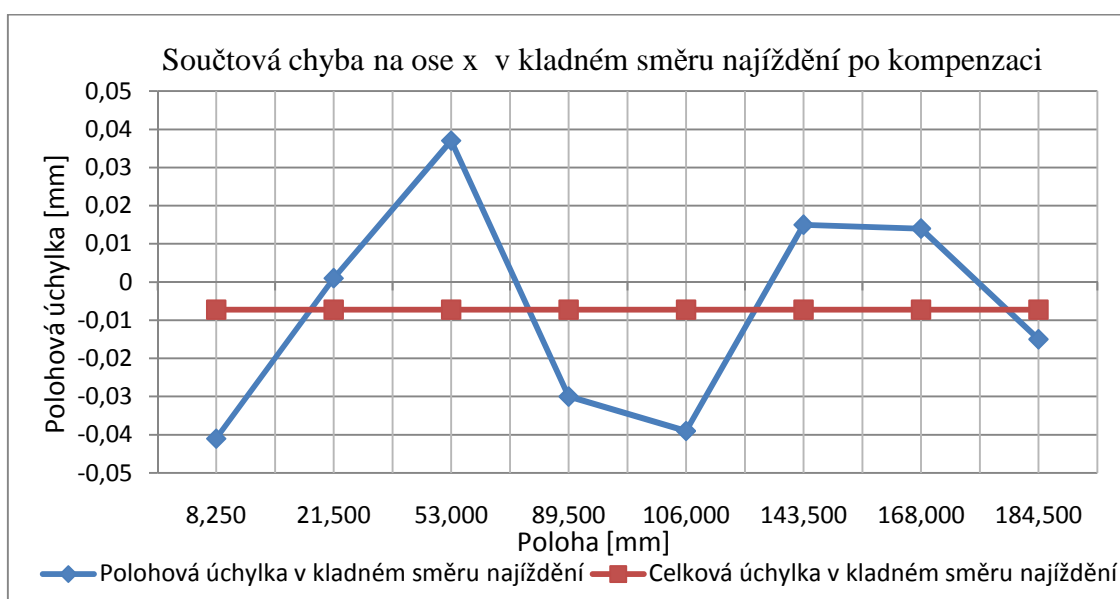




# Naměřené a vypočtené hodnoty součtové chyby po kompenzaci

| Zadaná poloha Pi (mm)                         | 8,250        |            | 21,500      |            | 53,000      |            | 89,500      |           | 106,000      |            | 143,500      |            | 168,000     |            | 184,500     |            |
|---|--------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|-----------|--------------|------------|--------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|
|   | ↓            | ↑          | ↓           | ↑          | ↓           | ↑          | ↓           | ↑         | ↓            | ↑          | ↓            | ↑          | ↓           | ↑          | ↓           | ↑          |
| Smýsl největší                                | -0,035       | -0,01      | 0,005       | -0,025     | 0,04        | -0,035     | -0,025      | 0,025     | -0,035       | -0,025     | 0,015        | -0,01      | 0,02        | -0,03      | -0,015      | 0,005      |
| Polohové úchyly (μm)                          | -0,04        | -0,005     | 0,005       | -0,025     | 0,035       | -0,03      | -0,035      | -0,03     | -0,035       | -0,025     | 0,02         | 0,015      | 0,015       | -0,025     | 0           | -0,005     |
|   | -0,04        | -0,01      | 0,005       | -0,03      | 0,035       | -0,03      | -0,015      | -0,035    | -0,045       | -0,025     | 0,01         | -0,02      | 0,01        | -0,03      | -0,025      | -0,01      |
|   | -0,045       | -0,005     | -0,005      | -0,025     | 0,04        | -0,03      | -0,035      | -0,03     | -0,035       | -0,02      | 0,015        | -0,01      | 0,015       | -0,02      | -0,015      | 0          |
|   | -0,045       | -0,02      | -0,005      | -0,03      | 0,035       | -0,035     | -0,04       | -0,035    | -0,045       | -0,035     | 0,015        | -0,02      | 0,01        | -0,03      | -0,02       | -0,015     |
| Průměrná jednosměrná polohová úchylna Xi (μm) | -0,041       | -0,01      | 0,001       | -0,027     | 0,037       | -0,032     | -0,03       | -0,021    | -0,039       | -0,024     | 0,015        | -0,009     | 0,014       | -0,027     | -0,015      | -0,007     |
| Celková jednosměrná polohová úchylna Xi (μm)  | -0,00725     |            | -0,00725    |            | -0,00725    |            | -0,00725    |           | -0,00725     |            | -0,00725     |            | -0,00725    |            | -0,00725    |            |
| Odhad běžné nejistoty Si (μm)                 | 4,18E-03     | 6,12E-03   | 5,48E-03    | 2,74E-03   | 2,74E-03    | 5,48E-03   | 1,00E-02    | 2,58E-02  | 5,48E-03     | 7,42E-03   | 3,54E-03     | 1,43E-02   | 4,18E-03    | 4,47E-03   | 9,35E-03    | 5,70E-03   |
|   | 8,37E-03     | 1,22E-02   | 1,10E-02    | 5,48E-03   | 5,48E-03    | 5,48E-03   | 2,00E-02    | 5,17E-02  | 1,10E-02     | 1,48E-02   | 7,07E-03     | 2,86E-02   | 8,37E-03    | 8,94E-03   | 1,87E-02    | 1,14E-02   |
|   | -0,0493666   | -0,0222474 | -0,0099545  | -0,0324772 | 0,0315228   | -0,0374772 | -0,05       | -0,072672 | -0,0499545   | -0,0388324 | 0,0079289    | -0,0376356 | 0,0056334   | -0,0359443 | -0,0337083  | -0,0184018 |
|   | -3,26E-02    | 2,25E-03   | 1,20E-02    | -2,15E-02  | 4,25E-02    | -2,65E-02  | -1,00E-02   | 3,07E-02  | -2,80E-02    | -9,17E-03  | 2,21E-02     | 1,96E-02   | 2,24E-02    | -1,81E-02  | 3,71E-03    | 4,40E-03   |
| Jednosměrná opakovatelnost Ri=4Si (μm)        | 1,67E-02     | 2,45E-02   | 2,19E-02    | 1,10E-02   | 1,10E-02    | 1,10E-02   | 4,00E-02    | 1,03E-01  | 2,19E-02     | 2,97E-02   | 1,41E-02     | 5,73E-02   | 1,67E-02    | 1,79E-02   | 3,74E-02    | 2,28E-02   |
| Nečitlivost Bi (μm)                           | -0,031       |            | 0,028       |            | 0,069       |            | -0,009      |           | -0,015       |            | 0,024        |            | 0,041       |            | -0,008      |            |
| Dvousměrná opakovatelnost Ri (μm)             | -0,020692976 |            | 0,036215838 |            | 0,074477226 |            | 0,026836021 |           | -0,002106576 |            | 0,041853355  |            | 0,049655436 |            | 0,007055021 |            |
| Průměrná dvousměrná polohová úchylna Xi (μm)  | -0,0255      |            | -0,013      |            | 0,0025      |            | -0,0255     |           | -0,0315      |            | 0,003        |            | -0,0065     |            | -0,011      |            |
| Přesnost nastavení pohybu v ose A             |              |            |             |            |             |            | 0,04248     |           | -            |            | -0,072672043 |            |             |            |             |            |

## Grafy součtové chyby před kompenzací



Naměřené a vypočtené hodnoty součtové chyby po kompenzaci hystereze, bez kompenzace součtové chyby

| Zadaná poloha P <sub>i</sub> (mm)             | 8,250                 |            | 21,500       |            | 53,000       |            | 89,500       |           | 106,000      |            | 143,500     |            | 168,000     |            | 184,500      |            |
|---|-----------------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|-----------|--------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|--------------|------------|
|   | ↓                     | ↑          | ↓            | ↑          | ↓            | ↑          | ↓            | ↑         | ↓            | ↑          | ↓           | ↑          | ↓           | ↑          | ↓            | ↑          |
| Smysl nařetí                                  | -0,055                | -0,005     | -0,03        | -0,01      | -0,075       | -0,005     | -0,205       | 0,01      | -0,215       | -0,035     | -0,185      | -0,13      | -0,23       | -0,18      | -0,275       | -0,225     |
|   | -0,04                 | -0,01      | -0,035       | -0,01      | -0,07        | 0          | -0,2         | 0,005     | -0,205       | -0,035     | -0,195      | -0,13      | -0,225      | -0,18      | -0,28        | -0,225     |
|   | -0,04                 | -0,01      | -0,05        | -0,005     | -0,075       | -0,005     | -0,21        | 0,01      | -0,21        | -0,04      | -0,205      | -0,13      | -0,24       | -0,175     | -0,29        | -0,22      |
|   | -0,04                 | -0,005     | -0,05        | 0          | -0,075       | -0,01      | -0,21        | 0,01      | -0,215       | -0,04      | -0,21       | -0,135     | -0,24       | -0,18      | -0,285       | -0,23      |
| -0,04   | -0,01                 | -0,045     | -0,005       | -0,005     | -0,08        | -0,01      | -0,215       | 0,01      | -0,215       | -0,04      | -0,2        | -0,13      | -0,235      | -0,18      | -0,29        | -0,23      |
| Průměrná jednosměrná polohová úchylna Xi (μm) | -0,043                | -0,008     | -0,042       | -0,006     | -0,075       | -0,006     | -0,208       | 0,009     | -0,212       | -0,038     | -0,199      | -0,131     | -0,234      | -0,179     | -0,284       | -0,226     |
| Celková jednosměrná polohová úchylna Xi (μm)  | -0,162125             |            | -0,162125    |            | -0,162125    |            | -0,162125    |           | -0,162125    |            | -0,162125   |            | -0,162125   |            | -0,162125    |            |
| Odhad běžné nejistoty Si (μm)                 | 6,71E-03              | 2,74E-03   | 9,08E-03     | 4,18E-03   | 3,54E-03     | 4,18E-03   | 5,70E-03     | 2,24E-03  | 4,47E-03     | 2,74E-03   | 9,62E-03    | 2,24E-03   | 6,52E-03    | 2,24E-03   | 6,52E-03     | 4,18E-03   |
| 2Si (μm)                                      | 1,34E-02              | 5,48E-03   | 1,82E-02     | 8,37E-03   | 7,07E-03     | 8,37E-03   | 1,14E-02     | 4,47E-03  | 8,94E-03     | 5,48E-03   | 1,92E-02    | 4,47E-03   | 1,30E-02    | 4,47E-03   | 1,30E-02     | 8,37E-03   |
| Xi - 2Si (μm)                                 | -0,0564164            | -0,0134772 | -0,0601659   | -0,0143666 | -0,0820711   | -0,0143666 | -0,2194018   | 0,0045279 | -0,2209443   | -0,0434772 | -0,2182354  | -0,1354721 | -0,2470384  | -0,1834721 | -0,2970384   | -0,2343666 |
| Xi + 2Si (μm)                                 | -2,96E-02             | -2,52E-03  | -2,38E-02    | 2,37E-03   | -6,79E-02    | 2,37E-03   | -1,97E-01    | 1,35E-02  | -2,03E-01    | -3,25E-02  | -1,80E-01   | -1,27E-01  | -2,21E-01   | -1,75E-01  | -2,71E-01    | -2,18E-01  |
| Jednosměrná opakovatelnost Ri=4Si (μm)        | 2,68E-02              | 1,10E-02   | 3,63E-02     | 1,67E-02   | 1,41E-02     | 1,67E-02   | 2,28E-02     | 8,94E-03  | 1,79E-02     | 1,10E-02   | 3,85E-02    | 8,94E-03   | 2,61E-02    | 8,94E-03   | 2,61E-02     | 1,67E-02   |
| Nečitlivost Bi (μm)                           | -0,035                |            | -0,036       |            | -0,069       |            | -0,217       |           | -0,174       |            | -0,068      |            | -0,055      |            | -0,058       |            |
| Dvousměrná opakovatelnost Ri (μm)             | -0,025553183          |            | -0,022733749 |            | -0,061281166 |            | -0,209063055 |           | -0,166789251 |            | -0,05614624 |            | -0,04624473 |            | -0,047297497 |            |
| Průměrná dvousměrná polohová úchylna Xi (μm)  | -0,0255               |            | -0,024       |            | -0,0405      |            | -0,0995      |           | -0,125       |            | -0,165      |            | -0,2065     |            | -0,255       |            |
| Přesnost nastavení polohy v ose               | 0,01347 - 0,297038405 |            |              |            |              |            |              |           |              |            |             |            |             |            |              |            |

Grafy součtové chyby po kompenzaci hystereze, bez kompenzace součtové chyby

